



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

Dipartimento di *Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente*

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN**

**SCIENZE E TECNOLOGIE PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO**

**CURRICULUM RIPRISTINO E VALORIZZAZIONE DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO**

***Analisi spazio-temporale della salinità del  
suolo in un'area costiera veneta***

Relatore:

Prof. **FRANCESCO MORARI**

Correlatore:

Dott. **ELIA SCUDIERO**

Laureando: **DIEGO MENGARDO**

Matricola n. **604726 STT**

**ANNO ACCADEMICO 2011- 2012**





# INDICE

<b>RIASSUNTO.....</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>4</b>
<b>1 INTRODUZIONE.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 La salinità dei suoli.....</b>	<b>7</b>
1.1.1 La salinità nelle aree costiere: .....	9
1.1.2 L'intrusione salina ai margini della Laguna di Venezia .....	13
<b>1.2 Il Progetto Strategico GEORISK.....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 Misurare la salinità .....</b>	<b>16</b>
1.3.1 Salinità del sistema acqua-suolo e conducibilità elettrica apparente .....	19
1.3.2 Modello basato sulla legge di Archie (1942) .....	22
<b>1.4 Il movimento dei sali e dell'acqua nel terreno.....</b>	<b>23</b>
<b>1.5 Scopo della tesi.....</b>	<b>24</b>
<b>2 MATERIALI E METODI.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Area di studio .....</b>	<b>25</b>
2.1.1 Caratterizzazione del suolo dell'area .....	26
2.1.1.1 La selezione dei punti di monitoraggio per le analisi del suolo .....	26
<b>2.2 Le analisi di campo.....</b>	<b>33</b>
2.2.1 Localizzazione delle stazioni di monitoraggio .....	33
2.2.2 I suoli delle stazioni di monitoraggio.....	34
<b>2.3 Descrizione delle stazioni di monitoraggio .....</b>	<b>37</b>
2.3.1 Le operazioni di campo .....	42
<b>2.4 Dati meteo.....</b>	<b>43</b>
<b>2.5 Analisi dei dati .....</b>	<b>43</b>
2.5.1 Ottimizzazione del modello di Archie.....	45
<b>3. RISULTATI .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1 Analisi e discussione dei dati rilevati dalle sonde .....</b>	<b>49</b>
3.1.1 Il Contenuto idrico volumetrico .....	50
3.1.2 La conducibilità elettrica apparente.....	53
3.1.3 Temperatura media misurata dalle sonde STE .....	57
<b>3.2 Analisi qualitativa delle acque .....</b>	<b>58</b>

3.2.1 Andamento dell' $EC_w$ nel corso dei tre periodi nelle cinque stazioni .....	63
3.2.2 Le analisi delle acque di falda nelle singole stazioni.....	69
3.2.3 Risultati della PCA.....	77
<b>3.3 Applicazione del modello di Archie .....</b>	<b>81</b>
3.3.1 Confronto tra il modello di Topp ed uno ottimizzato per la stima del contenuto idrico volumetrico .....	82
3.3.1.1 Relazione tra umidità volumetrica osservata e quella calcolata con la relazione di Topp ....	82
3.3.1.2 Relazione tra umidità volumetrica osservata e quella calcolata mediante un modello <i>ad hoc</i> .....	84
3.3.1.3 Ottimizzazione dei parametri per il modello <i>ad hoc</i> .....	85
3.3.2 Confronto tra il modello di Archie e un modello di Archie ottimizzato per la stima dell' $EC_p$ .....	87
3.3.2.1 Relazione tra i valori di $EC_p$ osservati ed $EC_p$ calcolati con la formula di Archie .....	87
3.3.2.2 Relazione tra i valori di $EC_p$ osservati e quelli calcolati con la formula di Archie ottimizzata	88
3.3.2.3 Ottimizzazione dei parametri per il modello di Archie ottimizzato .....	90
3.3.3 Conducibilità elettrica dell'acqua dei pori calcolata attraverso il modello di Archie ottimizzato .....	91
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>95</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>97</b>

## RIASSUNTO

In questa tesi viene presentato uno studio sulle dinamiche spazio-temporali della salinità in un'area ai margini della Laguna di Venezia, ponendo particolare attenzione al processo di intrusione salina che va ad influenzare i sistemi d'acqua superficiali presenti nel territorio, andando quindi ad incidere sulla produttività delle coltivazioni.

Il livello di salinizzazione e la produttività dei suoli sono influenzati dall'equilibrio tra la piovosità e la risalita capillare dalle falde superficiali; sono questi due processi, a seconda delle caratteristiche del suolo, a regolare la distribuzione dei sali lungo il profilo verticale.

Gli obiettivi principali di questo progetto sono: I°) valutare lo stato di salinità delle soluzioni circolanti del suolo in diverse aree e a diverse profondità; II°) studiare la distribuzione orizzontale e verticale della salinità, confrontando i risultati ottenuti nelle diverse stazioni di misura; III°) utilizzare i dati ottenuti per la calibrazione di una sonda resistivo-capacitiva e permettere la misura in continuo dei valori di conducibilità elettrica della soluzione circolante, per monitorare la dinamica della salinità.

In base ai valori di conducibilità elettrica apparente del suolo, che ha permesso l'identificazione di alcune aree omogenee, sono state disposte cinque stazioni di monitoraggio (A, B, C, D, E), ognuna delle quali attrezzata per il rilievo in continuo a quattro diverse profondità (10, 30, 50, 70 cm). Sono stati considerati come parametri da indagare: il contenuto idrico volumetrico, la conducibilità elettrica apparente, la temperatura e il potenziale matriciale. In ogni stazione sono stati inoltre installati quattro microlisimetri e un piezometro per il prelievo delle soluzioni circolanti nel terreno e dell'acqua di falda, successivamente analizzate in laboratorio per la determinazione delle caratteristiche chimico-fisiche.

Dalle analisi dei dati è emersa un'ampia eterogeneità per tutti i valori indagati, con variazioni molto ampie sia confrontando le stazioni, che in rapporto alla profondità considerata. I dati mostrano una dipendenza significativa della salinità dall'altezza di falda, dalla tessitura del suolo e dalla vicinanza alla laguna; è stato rilevato inoltre che una stazione in particolare risulta maggiormente influenzata da tale fenomeno, soprattutto in un anno siccitoso come il 2011. Le aree principalmente sabbiose presentano invece bassi

valori di salinità, ad indicare che il processo di lisciviazione, più significativo in questo tipo di terreni, trasporta i sali verso il basso ed ostacola la risalita capillare dell'acqua salata dalla falda.

A causa dell'elevata eterogeneità del territorio, dovuta sia a processi naturali che ad interventi antropici, ci si trova quindi di fronte a situazioni molto complesse da descrivere, ognuna caratterizzata da un proprio andamento della salinità, che risulta comunque dipendente dai principali fattori indagati (altezza di falda, piovosità, vicinanza alla laguna e tessitura del terreno).

## **ABSTRACT**

A study on the hydrogeological settings of a coastland area on the southern edge of the Venice Lagoon is presented in this thesis. The work particularly focuses on the dynamics of saltwater intrusion, which affects the quality of fresh groundwater and waterbodies, with consequent repercussions on soil quality and agricultural activities.

Soil salinity is ruled by both precipitations and upwards water fluxes due to evapotranspiration. According to the soil type, these two processes determine the distribution of salinity throughout the soil column in the vadose zone.

This thesis aims to: I) assess the salinity levels of pore-water at different depths and locations; II) study the horizontal and vertical distribution of soil salinity, comparing data from monitoring stations at different locations; III) calibrate a capacitance-resistance probe in order to gain continuous readings of pore-water electrical conductivity, which is strictly related to salinity.

In a 25 ha study area in Ca' Bianca, Chioggia, Venice; a field scale electromagnetic-induction-based apparent electrical conductivity survey allowed the designation of five management zones. A monitoring station was placed in each of the five zones (A, B, C, D, and E). Volumetric water content, apparent electrical conductivity, temperature, and matrix potential were continuously monitored at 10, 30, 50, and 70 cm deep. Microlysimeters and a well were placed in each of the stations for analyzing chemical and physical properties of ground and pore-water.

A high heterogeneity was evident in the results both within stations and depths. Salinity was normally dependent on the height of water table, on soil texture, and on the distance of the station from the Lagoon of Venice. Moreover the effects of salinity were magnified by the lack of precipitations in 2011, especially in the station closest to the Lagoon.

Sandy areas showed low salinity values, indicating that leaching plays a major role in those areas with poor retention characteristics. However such areas showed the lowest water content values, indicating such conditions as likely for the occurrence of water stress on the crops.

The high heterogeneity of the land in the southern edge of the Venice Lagoon poses a difficult task to landscape planners. Different interventions are needed in order to improve soil quality in the area in order to decrease salinity and avoid water stress where needed.



# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 La salinità dei suoli

Ogni suolo è caratterizzato da un naturale contenuto di sali, in quantità più o meno rilevanti, a seconda dei processi pedogenetici tramite i quali si sono formati (*Giardini, 2001*).

In natura, le principali fonti di sali sono il mare e gli oceani, che apportano direttamente sali solubili ai terreni costieri, sia per l'azione delle maree, che attraverso lo spray marino trasportato dal vento; altre cause sono il crescente uso d'acqua con elevato contenuto di sali per scopi irrigui e l'eccessivo sfruttamento delle falde sotterranee (*Aringhieri, 1999*).

I suoli vengono definiti salini quando si ha un accumulo di sali solubili tale da compromettere l'attività vegetativa e produttiva delle colture, e determinare effetti indesiderati sull'ambiente (*Fabbio e Fumanti, 2008*). Il limite oltre il quale un terreno è classificato come salino corrisponde ad un valore della conducibilità elettrica dell'estratto dalla pasta satura superiore a  $4 \text{ dS m}^{-1}$  (*Aringhieri, 1999; Giardini, 2002*).

La presenza di una certa quantità di sali nel terreno costituisce una caratteristica fondamentale per la formazione e il mantenimento di uno stato strutturale idoneo allo sviluppo vegetale; le giuste quantità favoriscono la flocculazione delle particelle colloidali del terreno, migliorandone la struttura e favorendo la circolazione di aria e acqua. Tuttavia, la presenza di condizioni che ne provocano il progressivo accumulo, possono causare seri danni alla fertilità fisica e chimica del terreno, con conseguenze dirette sulla disponibilità d'acqua e di nutrienti necessari per la crescita delle piante (*Aringhieri, 1999*).

Si possono individuare due tipologie di salinità: la salinità primaria, cioè quella di origine naturale, e la salinità secondaria, indotta dall'uomo attraverso pratiche agricole non adeguate e un uso non sostenibile del territorio (*Comel, 1972*).

La salinità del terreno, o della soluzione circolante, non è quasi mai statica, ma varia a seconda dei processi che la determinano, delle caratteristiche del suolo, e delle condizioni al contorno (precipitazioni, evapotraspirazione, altezza della falda, irrigazione,...).

La quantità dei sali presenti nel terreno può variare, oltre che in senso verticale (cioè lungo il profilo), anche in senso orizzontale, per uno spostamento da un luogo ad un altro in seguito alla direzione del movimento delle correnti saline (Aringhieri, 1999). Solo in casi particolari, la salinità di un terreno è dovuta all'alterazione delle rocce avvenuta in loco: per la maggior parte dei casi si tratta di sali trasportati dalle acque di scorrimento o di risalita, che in seguito hanno subito un'intensa evaporazione. Ne sono un esempio rappresentativo alcune zone di bonifica costiere: in queste aree, durante alcuni periodi dell'anno, non si rilevano quantità problematiche di sali, che vanno però via via aumentando durante i periodi caldi e siccitosi, in seguito al fenomeno dell'evapotraspirazione e della risalita capillare. Gli effetti della salinità risultano più marcati nei terreni argillosi rispetto a quelli sabbiosi, perché questi ultimi disperdono più facilmente nel sottosuolo le acque piovane e la loro scarsa capillarità ostacola la risalita delle acque e quindi dei sali.

Gli elementi e i composti chimici che hanno un ruolo fondamentale nella salinizzazione dei suoli sono principalmente il carbonato di sodio, il carbonato di magnesio, **il cloruro di sodio**, il solfato di calcio, il solfato di sodio e **il cloruro di sodio**. Questi sali si trovano disciolti sotto forma di ioni liberi, ovvero sotto forma di atomi dotati di carica elettrica.

*Tabella 1.1* - Ioni che hanno un ruolo decisivo nella salinizzazione (Aringhieri, 1999)

Cationi	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	
Anioni	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>

L'abbondanza delle specie ioniche che costituiscono i sali, deriva dalla facilità con cui possono circolare all'interno del suolo, che dipende a sua volta dal raggio ionico, dalla valenza, dalla stabilità del reticolo cristallino del suolo e dalla possibilità di precipitare in composti insolubili (Aringhieri, 1999).



*Tabella 1.2* - Coefficienti di energia delle principali specie ioniche raggruppate per sequenza di estrazione (Aringhieri, 1999)

Sequenza di estrazione	Ione	Coefficiente di energia
I	Cl <sup>-</sup> , Br <sup>-</sup>	0.23
	[NO <sub>3</sub> ] <sup>-</sup>	0.18
	[SO <sub>4</sub> ] <sup>-</sup>	0.66
	[CO <sub>3</sub> ] <sup>2-</sup>	0.77
II	Na <sup>+</sup>	0.45
	K <sup>+</sup>	0.36
	Ca <sup>2+</sup>	1.75
	Mg <sup>2+</sup>	2.1
III	[SiO <sub>3</sub> ] <sup>2-</sup>	2.75
IV	Fe <sup>3+</sup>	5.15
	Al <sup>3+</sup>	4.25

Un numero più alto nella sequenza di estrazione indica una minore mobilità della specie durante il processo di alterazione; gli elementi che hanno un ruolo più importante nei processi di salinizzazione dei suoli si trovano infatti nelle sequenze I e II: queste specie ioniche sono dotate di maggiore mobilità e quindi si disperdono più facilmente nel suolo (Aringhieri, 1999).

### **1.1.1 La salinità nelle aree costiere:**

Un recente studio effettuato sul territorio italiano ha evidenziato che le aree maggiormente affette dal fenomeno della salinizzazione risultano essere distribuite prevalentemente lungo la bassa pianura padano-veneta, le aree costiere tirreniche ed adriatiche e le isole (Dazzi, 2007).



Figura 1.1 - Distribuzione dei suoli salini in Italia (Dazzi, 2007)

Gli ambienti costieri appartengono agli ecosistemi più vulnerabili e a rischio su scala mondiale; la presenza di suoli salini in queste aree è dovuta principalmente all'intrusione dell'acqua di mare nelle acque sotterranee a causa della subsidenza del suolo, provocata, oltre che dall'origine paludosa, dall'estrazione d'acqua dalle falde per scopi irrigui o industriali e per attività di bonifica (ISPRA, 2009). Altre importanti cause risultano essere la dispersione dai fiumi e dai canali in condizioni di magra e/o di marea crescente.

Tabella 1.3 - Concentrazione dei principali costituenti disciolti nell'acqua di mare (Millero, 1996).

elemento	g/kg	%
Cloro	18.971	55.29
Solfato	2.639	7.69
Carbonato	0.071	0.21
Bromo	0.065	0.19
Sodio	10.497	30.59
Magnesio	1.278	3.72
Calcio	0.411	1.2
Stronzio	0.411	1.2
Potassio	0.379	1.1

L'intrusione dell'acqua salata nella falda avviene tramite la risalita del cuneo salino, cioè l'avanzamento dell'interfaccia fra acqua dolce e acqua marina. A causa della loro diversa

densità, si crea nel sottosuolo una superficie di contatto, che vede l'acqua salata proveniente del mare (più densa) incunearsi sotto quella dolce di falda (Carbognin e Tosi, 2003). Questo fenomeno, in condizioni naturali, si trova in equilibrio, in quanto generalmente la superficie della falda è superiore al livello del mare, e il carico idraulico risulta quindi sufficiente per contrastare l'avanzata dell'acqua salata (figura 1.2, a). L'abbassamento del livello della falda freatica a causa dell'emungimento attraverso pozzi o con l'eccessivo drenaggio dei terreni, può far sorgere dei problemi: l'acqua dolce non è più in grado di contrastare l'ingresso del cuneo salino e si innesca un processo di "inquinamento" della falda, con conseguente salinizzazione dell'entroterra costiero (figura 1.2, b).

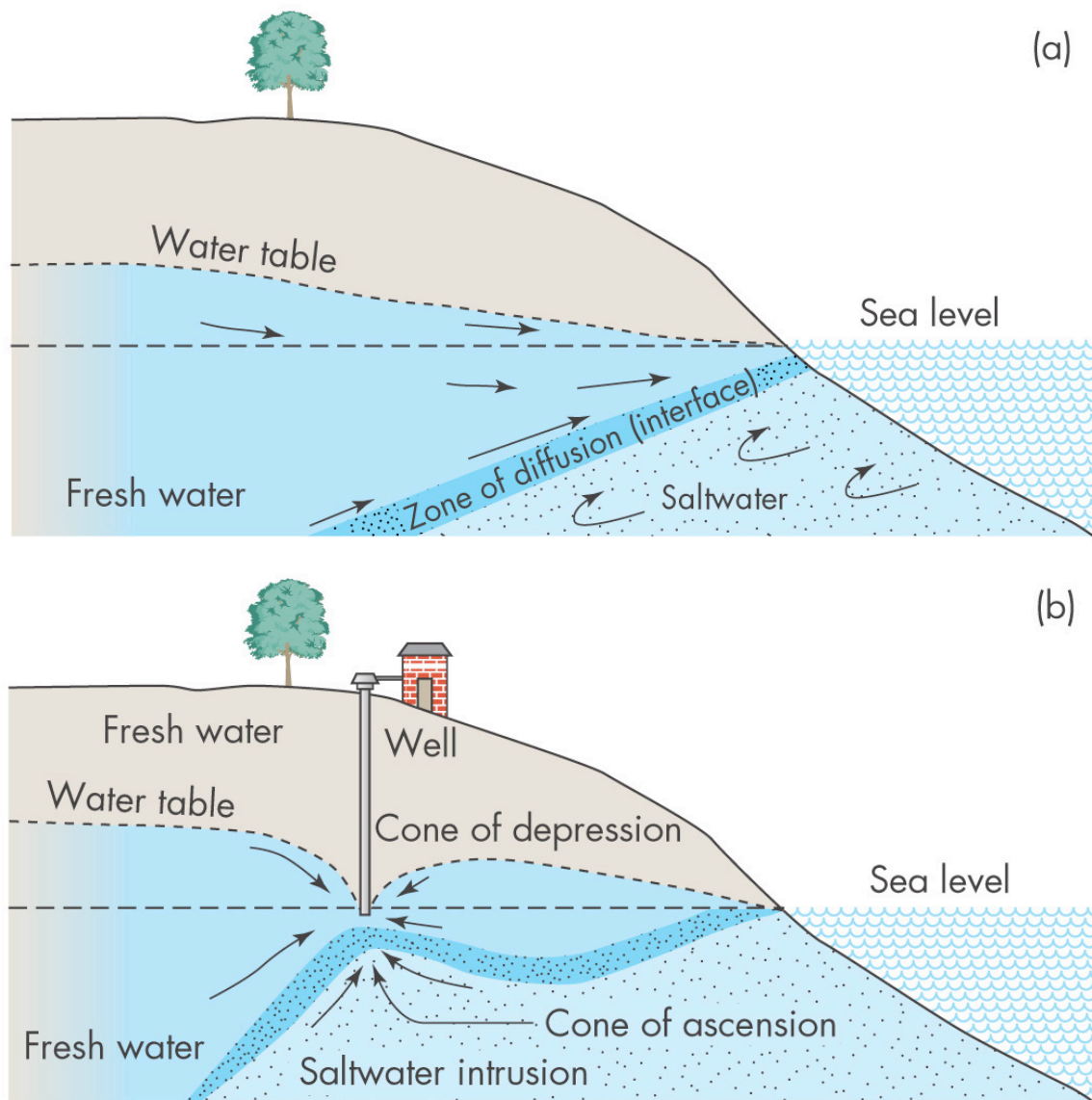


Figura 1.2 - Schema teorico della relazione tra acqua dolce e acqua salata negli acquiferi costieri (© Pearson Prentice Hall, 2005).

Lo spessore della zona di diffusione dipende dalla litologia, dalla fluttuazione stagionale della tavola d'acqua e dall'ampiezza delle maree.

L'equilibrio tra acque saline e dolci negli acquiferi freatici viene descritto dalla legge di Ghyben-Herzberg, che afferma: in un acquifero omogeneo e isotropico la profondità dell'interfaccia tra acqua dolce e salina è direttamente proporzionale all'elevazione del livello di falda sul livello medio marino (Badon e Ghijben 1888; Herzberg 1901).

La relazione matematica per gli acquiferi freatici è:

$$z = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} h \quad \text{eq. 1.1}$$

Dove  $\rho_w$  è la densità dell'acqua dolce ( $1000 \text{ g/cm}^3$ );  $\rho_s$  la densità dell'acqua marina (Mar Adriatico  $1035 \text{ g/cm}^3$ );  $z$  la profondità dell'interfaccia tra acqua dolce e salina;  $h$  l'altezza della superficie freatica sul livello medio marino.

Applicando la formula, si osserva che per ogni variazione della superficie freatica si avrà una variazione opposta circa trenta volte maggiore nella posizione dell'interfaccia tra acqua dolce e salina.

$$z = \frac{1000 \text{ g/cm}^3}{1035 \text{ g/cm}^3 - 1000 \text{ g/cm}^3} h \cong 29 \cdot h \quad \text{eq. 1.2}$$

Questo significa che quando fattori quali subsidenza, siccità o sfruttamento degli acquiferi ridurranno la superficie freatica di 0.1 m rispetto al livello del mare, l'interfaccia salirà di circa 3 m verso la superficie topografica. Una variazione minima della lente d'acqua dolce può dunque causare l'invasione di acqua marina in tutto l'acquifero freatico costiero (Marconi, 2011).

Altri fattori critici possono derivare dai cambiamenti climatici in atto, che portano ad un innalzamento del livello marino e all'aumento dell'aridità dei suoli, come conseguenza del progressivo innalzamento della temperatura atmosferica a causa dell'effetto serra.

Nelle aree al margine meridionale della Laguna di Venezia, il processo naturale di intrusione salina dovuta alla vicinanza al mare e alla laguna, viene ulteriormente aggravato dalla quota critica del territorio, in alcuni punti anche quattro metri sotto il livello del mare (Carbognin e Tosi, 2003).

Il fenomeno della salinizzazione viene considerato come uno dei principali fattori che inducono la desertificazione, e, in Europa, il JRC-IES (Join Research Centre-Institute for Environment and Sustainability) stima che da 1 a 3 milioni di ettari siano già stati interessati dal fenomeno (Wriedt e Bouraoui, 2009).

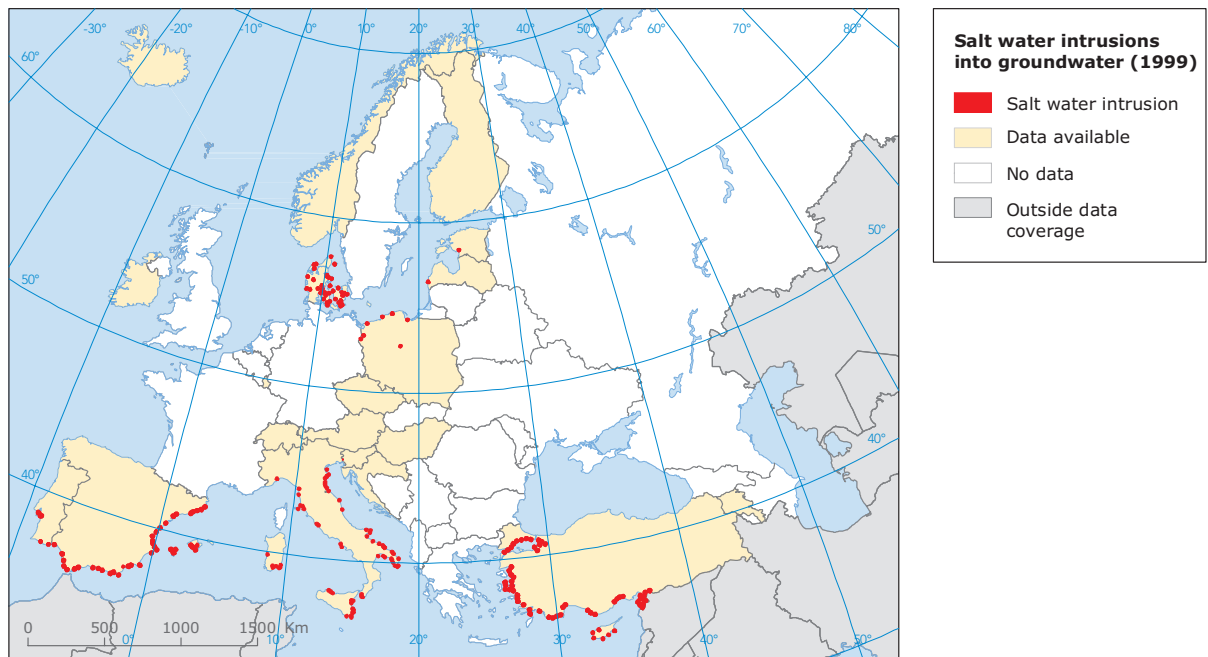


Figura 1.3 - Mappa Europea delle aree interessate dal fenomeno dell'intrusione salina (EEA, 1999)

### 1.1.2 L'intrusione salina ai margini della Laguna di Venezia

Le prime indagini relative al fenomeno dell'intrusione salina sul territorio veneziano risalgono agli inizi degli anni '70, e sono state condotte su incarico del Ministero dei Lavori Pubblici, nello specifico dal "Comitato per lo studio dei provvedimenti a difesa della città di Venezia ed a salvaguardia dei suoi caratteri ambientali e monumentali", con lo scopo di valutare l'entità e la distribuzione della contaminazione salina. Dalle indagini emerse che il fenomeno interessava una profondità massima di circa 20 m, ed era osservabile lungo tutto il margine interno della laguna (Carbognin e Tosi, 2003).

Il problema però è stato oggetto di maggiore attenzione solo nell'ultimo decennio, in concomitanza con gli allarmi climatici relativi a variazioni significative del livello del mare e/o a processi di desertificazione. Tali fenomeni hanno come conseguenza un progressivo

impoverimento delle risorse sotterranee anche in seguito a processi di salinizzazione, soprattutto nelle zone costiere. Nell'area lagunare, il problema è stato affrontato nell'ambito del Progetto Strategico "Ambiente e Territorio" del CNR e del successivo Progetto "Cuneo salino nel comune di Chioggia" della Provincia di Venezia.

L'analisi del rischio d'intrusione salina è stata effettuata attraverso simulazioni numeriche per diversi scenari di pompaggio, e i risultati ottenuti hanno permesso di affermare la trascurabilità del problema negli acquiferi profondi, ma non in quelli superficiali, che sono fortemente interessati al rischio di salinizzazione (Carbognin e Tosi, 2003).

Nel 2002-2003 è stato inoltre finanziato un programma di indagini finalizzato a identificare i punti critici, l'estensione del fenomeno e la localizzazione delle criticità in relazione alle attività economiche dell'area, principalmente di tipo agricolo-orticolo.

L'impatto economico della salinizzazione non è facile da valutare, a causa del rapporto non lineare tra salinizzazione e produttività: la produttività non è influenzata da livelli bassi di salinità, ma la situazione cambia se si oltrepassa una soglia specifica.

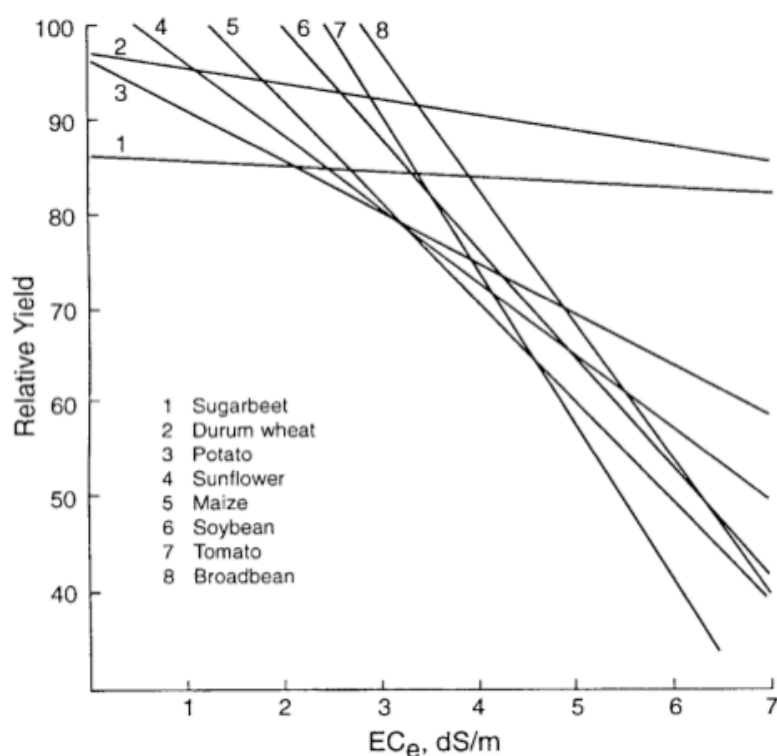


Figura 1.4 - Andamento della produttività di alcune colture in relazione alla salinità (Katerji et al., 2000)

## 1.2 Il Progetto Strategico GEORISK

Questo lavoro di tesi si inserisce all'interno di un Progetto Strategico dell'Ateneo di Padova intitolato "GEO-RISK" (*Processi Geologici, Morfologici ed Idrologici: Monitoraggio, Modellazione ed Impatto nell'Italia Nord-Orientale*), che riunisce competenze scientifiche diverse in un progetto di ricerca, con lo scopo di fornire nuove informazioni riguardo lo studio delle acque sotterranee di tutta la Regione Veneto. In particolare, questa parte di progetto si intitola: "*Effetti spazio temporali dell'intrusione salina sulla qualità del suolo e sulla produttività di Zea mais L.*" ed è gestito dai dipartimenti di *Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente (DAFNAE)* e di *Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA)*, in collaborazione con il dipartimento di Geoscienze e l'Istituto di Scienze Marine (ISMAR) del CNR di Venezia.

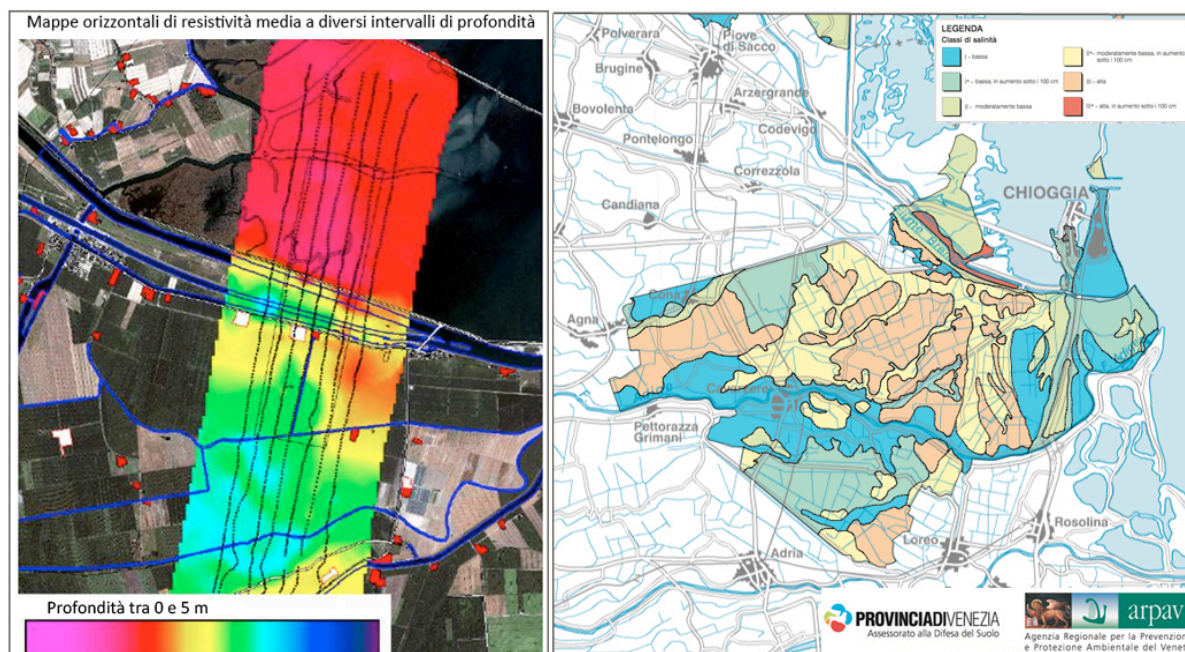
Il monitoraggio del cuneo salino consente di modellare il processo fisico di risalita e di aumentare le conoscenze sui processi di salinizzazione dei terreni agricoli lungo le aree costiere.

L'area indagata è infatti soggetta al fenomeno dell'intrusione di acqua salata dalla laguna, con conseguenze negative per l'attività agricola soprattutto nei periodi di siccità, quando l'interfaccia tra acqua dolce e acqua salata tende a salire in superficie.

Il progetto GEORISK ha i seguenti obiettivi:

1. stimare l'impatto spaziale dell'intrusione salina sul mais e più in generale sulla qualità dei suoli agrari;
2. definire i principali parametri idrogeologici del sito prescelto e caratterizzare l'intrusione salina dalla laguna e dai vari corpi idrici che in essa confluiscono;
3. modellare le proprietà e le dinamiche fisiche e chimiche del suolo con analisi in sito e di laboratorio, utilizzando metodi geostatistici;
4. prevedere possibili panorami futuri dovuti al cambiamento delle condizioni ambientali di contorno, quali: livello del mare (es. un possibile innalzamento dovuto a cambiamenti climatici), impoverimento della falda di acqua dolce e subsidenza del suolo;

- b)





comunemente utilizzata come espressione della concentrazione totale di sali disciolti in un campione acquoso (Rhoades et al., 1999).

I parametri da cui dipende sono (Rhoades et al., 1999):

- carica e concentrazione degli ioni;
- grado di dissociazione degli ioni;
- temperatura del campione;
- velocità di migrazione degli ioni nel campo elettrico (dipende dalla tortuosità del suolo).

Il valore della conducibilità elettrica può essere espresso in varie unità di misura; la più comune è il siemens (S) o meglio i suoi sottomultipli: il microSiemens per centimetro ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) e il milliSiemens per centimetro ( $\text{mS cm}^{-1}$ ), o il suo equivalente deciSiemens per metro ( $\text{dS m}^{-1}$ ):

$$1000 \mu\text{S cm}^{-1} = 1 \text{ mS cm}^{-1} = 1 \text{ dS m}^{-1}$$

Visto che la corrente elettrica viene trasportata dagli ioni in soluzione, la conduttività aumenta con l'aumentare della concentrazione degli ioni.

*Tabella 1.4 - Valori tipici di conduttività dell'acqua*

Tipologia	dS m <sup>-1</sup>
Acqua ultrapura	$5.5 \cdot 10^{-5}$
Acqua potabile	0.05 - 0.5
Acqua di mare	50

La determinazione della conducibilità generalmente coinvolge la misurazione fisica della resistenza elettrica dei materiali, che è espressa in ohm. La resistenza di un materiale conduttore (ad esempio una soluzione salina) è inversamente proporzionale alla sua area di sezione trasversale e direttamente proporzionale alla sua lunghezza. Quindi, la grandezza della misura della resistenza dipende dalle dimensioni del volume contenente il campione e gli elettrodi (Rhoades et al., 1999).

La conducibilità elettrica aumenta di circa 1,9% per ogni grado centigrado di temperatura, pertanto, l'EC viene comunemente riferita ad una temperatura standard (solitamente 25°C) per poter comparare le misure di salinità.

Per scopi pratici di valutazione della salinità agricola, l'EC viene misurata ad una temperatura nota diversa da 25°C e quindi la lettura va adeguata tramite un coefficiente di temperatura (Rhoades et al., 1999).

Il modo più frequente ed efficace fino ad oggi impiegato per valutare la quantità di sali solubili presenti in un suolo, e quindi la sua salinità, è quello di determinare la conducibilità del suo estratto di pasta satura. I campioni per la misura dell'EC<sub>e</sub> (conducibilità elettrica dell'estratto saturo) possono essere ottenuti in laboratorio portando a completa saturazione con acqua distillata un campione di suolo, e misurando la conducibilità elettrica espressa in dS m<sup>-1</sup> a 25°C di un campione d'acqua ottenuto per aspirazione. Questo metodo, elaborato dall'*U.S. Salinity Laboratory* dell'*USDA* (Richards, 1954), viene considerato lo standard di riferimento a livello internazionale, attraverso cui è possibile eseguire la comparazione e il confronto tra diversi campioni di suolo. Un terreno viene classificato come salino quando l'EC della pasta satura è superiore a 4 dS m<sup>-1</sup>, limite di salinità alla quale la maggior parte delle colture iniziano ad essere influenzate negativamente dalla concentrazione dei sali.

Metodi alternativi, sempre basati sul principio della conducibilità elettrica, ma che risultano più veloci e di facile esecuzione, consistono nella misura della EC su estratti di suolo diluiti in acqua distillata; frequentemente si tratta di estratti acquosi ottenuti dai rapporti 1:2 o 1:5.

Un altro sistema per la misura dell'EC, in questo caso senza la necessità di prelevare un campione di suolo, consiste nel raccogliere un campione d'acqua dal terreno tramite un estrattore *in situ* e poi misurarne la EC; in questo caso si tratterà dell'EC<sub>p</sub> (conducibilità elettrica dell'acqua presente nei pori o della soluzione circolante). Questo procedimento avviene tramite l'utilizzo di microlisimetri: strumenti in grado di estrarre l'acqua circolante dal suolo tramite suzione, in seguito all'applicazione di una pressione negativa.

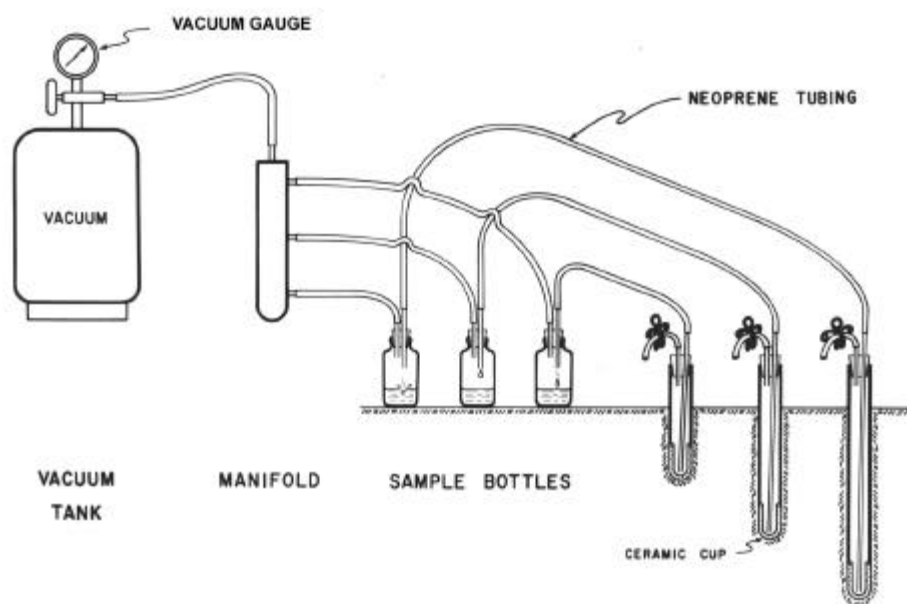


Figura 1.6 - Sistema di campionamento della soluzione circolante del suolo mediante lisimetri collegati ad una pompa a vuoto (Rhoades et al., 1999).

Un'evoluzione dei metodi di misura della salinità, senza che sia necessario prelevare campioni di suolo o acqua, consiste nella determinazione della resistività elettrica del suolo, in seguito convertita in valori di conducibilità.

La conducibilità elettrica apparente del suolo ( $EC_a$ ) può essere determinata in campo impiegando sonde di tipo elettrico, poste a diretto contatto con il suolo, o, in alternativa, con strumenti basati sul principio dell'induzione elettromagnetica (EMI), che consentono di risalire indirettamente al valore di  $EC_a$  del suolo senza che ci sia un contatto diretto con esso.

### 1.3.1 Salinità del sistema acqua-suolo e conducibilità elettrica apparente

Teoricamente, la conducibilità elettrica della soluzione circolante rappresenta un indice di salinità migliore rispetto a quello tradizionalmente misurato sull'estratto saturo ( $EC_e$ ); questo perché le radici delle piante estraggono le loro sostanze nutritive dalla soluzione del suolo, ne assorbono i soluti e consumano l'acqua attraverso il processo di traspirazione. Inoltre, in suoli in cui la mobilità dei sali è molto elevata, come nelle aree con falda salina molto superficiale, l' $EC_e$  può cambiare notevolmente anche in brevi intervalli di tempo. È quindi importante sviluppare una tecnica di monitoraggio in

continuo della salinità del suolo. Tuttavia l' $EC_p$  non è stata ampiamente usata per misurare o esprimere la salinità, per il fatto che questo parametro non può essere determinato in modo diretto da sensori posti nel terreno, varia in funzione al contenuto idrico, e la soluzione circolante è difficilmente estraibile dal suolo ai tipici contenuti d'acqua di campo.

In generale, i sensori leggono la conducibilità elettrica apparente del terreno ( $EC_a$ ), che non corrisponde solo alla conduttanza della soluzione acquosa circolante nel suolo, ma deriva anche da quella delle particelle solide e dei cationi scambiabili presenti nell'interfaccia solido-liquido dei colloidi; è quindi il risultato del contributo delle tre fasi che costituiscono il terreno: solida, liquida e gassosa.

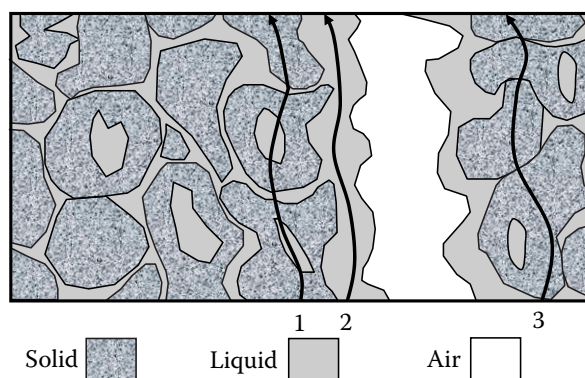


Figura 1.7 - Vie di propagazione di un segnale elettrico nel suolo (Rhoades et al., 1999) nella misura di  $EC_a$  (Allred et al., 2008)

La fase solida, se si escludono i frammenti più grandi, può essere classificata tramite la dimensione dei grani in: argilla (meno di 0.002 mm), limo (da 0.002 a 0.05 mm) o sabbia (da 0.05 a 2 mm). Nelle frazioni di sabbia e limo sono generalmente presenti alte percentuali di quarzo che, assieme all'aria che costituisce la fase gassosa, sono considerati degli eccellenti isolanti elettrici, e andranno quindi ad opporsi al flusso di corrente elettrica. La frazione colloidale è invece formata principalmente da minerali argillosi e materia organica; questi, in condizioni di umidità sufficiente, contribuiscono in maniera significativa al flusso della corrente elettrica nel suolo. Da ultimo, la fase solido-liquida, che costituisce la soluzione circolante del terreno, contiene numerosi elettroliti che risultano essere i principali responsabili della conduzione di corrente nel suolo (Rhoades et al., 1999).

Anche se non è ancora chiaro in quale modo il segnale elettrico si diffonda nel terreno, una panoramica sull'argomento si può trovare in Friedman (2005) e Allred et al. (2008). La conduttività elettrica apparente può essere stimata dalla costante dielettrica del suolo ( $\epsilon_r$ ) (Dalton et al., 1984), o dalla resistenza elettrica del terreno che si oppone a una corrente elettrica alternata, comunemente espressa in ohm.

$EC_p$  ed  $EC_a$  risultano strettamente correlati, infatti ad un aumento di ioni nella soluzione del suolo corrisponde un aumento dei valori di  $EC_b$  (Rhoades et al., 1976; Rhoades et al., 1989; Saito et al., 2008), che potrebbe essere proporzionale all'aumento della  $EC_p$ , a seconda del tipo di terreno e delle sue proprietà (Dyer et al., 2008).

Sulla base delle misure di  $EC_a$ , nonostante non rappresentino una valutazione diretta del grado di salinità della soluzione circolante del suolo, è possibile, attraverso particolari procedure di conversione o relazioni empiriche, dedurre la salinità in termini di  $EC_e$  o di  $EC_p$ . Tuttavia, come ha affermato e dimostrato Dalton (Dalton et al., 1984), l' $EC_a$  non è influenzato esclusivamente da  $EC_p$ .

I modelli normalmente usati per stimare  $EC_p$  sono di solito basati sul rapporto tra la  $EC_a$  e  $\theta$  a valori costanti di  $EC_p$ , in cui la grandezza della  $EC_a$  varia a seconda della tortuosità dei percorsi della corrente elettrica (determinata dalla tessitura del suolo, dalla sua densità, dalla geometria delle particelle, dalla distribuzione dei pori delle particelle e dal contenuto di materia organica), che può essere espressa in termini di un fattore di trasmissione del suolo ( $\pi$ ) (Heimovaara et al., 1995; Mualem e Friedman, 1991; Rhoades et al., 1976) o in termini di parametri connessi al tipo di suolo (Archie, 1942; Hilhorst, 2000; Malicki e Walczak, 1999). In generale, i modelli contengono almeno un parametro suolo-specifico.

Al fine di scegliere e applicare uno dei modelli è necessario un legame tra tali parametri e le proprietà del suolo. Per alcuni modelli queste informazioni sono già disponibili (ad esempio Malicki e Walczak, 1999), mentre nella maggior parte dei casi sono ancora in discussione o semplicemente non esistono.

Un confronto tra diversi modelli per determinare  $EC_p$  può essere visto in Amente et al., 2000; Friedman, 2005; Hamed e Magnus Berndtsson, 2003; Persson, 2002.

I valori di  $EC_a$  sono quindi influenzati da molti fattori, tutti riguardanti le caratteristiche chimico-fisiche del suolo; i principali sono:

- la salinità del suolo ( $EC_e$ ): la presenza di elettroliti aumenta la capacità di un suolo di trasferire corrente elettrica;
- la porosità del suolo: più il suolo è poroso, più facilmente si lascerà attraversare dalla corrente elettrica;
- il contenuto volumetrico in acqua ( $\theta$ ): terreni umidi, grazie agli elettroliti presenti nella soluzione circolante, conducono meglio l'elettricità rispetto ai terreni secchi dove i collegamenti liquidi tra pori vengono a mancare;
- la capacità di scambio cationico: suoli contenenti quantità elevate di sostanza organica e/o minerali argillosi presentano una forte predisposizione allo scambio ionico con la soluzione circolante del suolo;
- la temperatura: all'aumento di ogni grado centigrado di temperatura, la conducibilità elettrica aumenta di circa 1,9%.

### 1.3.2 Modello basato sulla legge di Archie (1942)

In termini di conducibilità elettrica, la relazione maggiormente utilizzata per determinare la risposta di materiali geologici saturi d'acqua, è la legge empirica di Archie, che fornisce un'interpretazione del comportamento della resistività di suoli sabbiosi e limosi, basandosi sul flusso di una corrente elettrolitica attraverso un mezzo poroso.

Questa legge quantifica la relazione tra la conducibilità elettrica apparente del mezzo poroso ( $EC_a$ ), la conducibilità elettrica della soluzione elettrolitica acquosa presente nel mezzo poroso ( $EC_p$ ) e la quantità di soluzione elettrolitica presente per unità di volume del mezzo poroso; quindi

$$EC_a = (k^{-1}) \cdot \varphi^m \cdot S^n \cdot EC_p \quad eq. 1.3$$

dove  $k$  è una costante con un valore che varia tra 0.5 e 2.5;  $\varphi$  è la porosità;  $S$  la saturazione relativa;  $m$  una costante che varia tra 0.5 e 3 e  $n$  una costante con un valore solitamente pari a 2 con  $S$  maggiore di 0.3 (Corwin *et al.*, 2008).

Tabella 1.5 - Alcuni valori tipici per le costanti  $k$  ed  $m$

Litotipo	$k$	$m$
sabbie sciolte	1	1.3
sabbie scarsamente cementate	0.7	0.9
arenarie moderatamente cementate	0.5	2.2
calcarei compatti	0.5	1.8
calcarei microcristallini	0.8	2.3
piroclastiti sciolte a porosità medio-alta	2.8	1.7
rioliti	4.5	1.7

Questa legge è stata sviluppata, in particolar modo, per rocce e sedimenti privi di argilla: viene quindi usata per suoli che contengono minerali argillosi o materia organica in piccole quantità.

La legge di Archie è stata modificata per risultare applicabile sia alle condizioni di saturazione che a quelle di non saturazione di ogni tipo di terreno, tenendo conto anche della presenza dell'argilla; in questo caso, la formula risulta:

$$EC_a = (k^{-1}) \cdot \varphi^m \cdot S^n \cdot EC_p + EC_s \quad eq. 1.4$$

dove  $EC_s$  rende conto, qualora presente, della conduttività delle superfici delle particelle e dipende quindi dalla percentuale di argilla presente.

Quindi, sulla base di misure di resistività apparente ( $EC_a$ ), è possibile ricavare informazioni riguardanti la presenza, la distribuzione e le caratteristiche dell'acqua.

In generale, se è presente acqua, le misure di resistività possono essere considerate misure della saturazione e della connessione tra i pori.

Inoltre, l'aumento della quantità d'acqua, della salinità, della porosità, del numero di fratture e della temperatura, tendono a far diminuire la resistività.

#### 1.4 Il movimento dei sali e dell'acqua nel terreno

Il trasporto di sostanze o composti, solubili o parzialmente solubili, è strettamente connesso con il movimento dell'acqua nel suolo. Poiché il contenuto idrico, e in

particolare il potenziale, influenzano l'evoluzione spaziale e temporale dei processi sia di erosione sia di inquinamento, la sua misura è importante non solo in agricoltura, ma anche in geopedologia e nell'analisi ambientale (Benincasa e Maracchi, 2001). La direzione verso cui si muovono i sali dipende quindi principalmente dal verso in cui si muove l'acqua. In caso di precipitazioni o in seguito al processo di irrigazione, si avrà un trasporto dei sali verso il basso, seguendo il fenomeno dell'infiltrazione idrica; in caso di falda superficiale e/o di suzione da parte delle piante, avremo invece una risalita capillare e quindi un trasporto verso l'alto dei sali, con un conseguente accumulo nella zona radicale. Questo fenomeno, per un dato suolo, dipende dalla velocità di infiltrazione dell'acqua, che a sua volta dipende dal contenuto idrico del suolo stesso.

I sali non si muovono soltanto con l'acqua del suolo, ma anche al suo interno, in risposta ai gradienti di concentrazione, spostandosi da zone a concentrazione maggiore verso zone a concentrazione minore (processo di diffusione).

La comprensione di tali interazioni risulta fondamentale nella gestione dei suoli agrari, soprattutto di quelli costieri a rischio di salinizzazione e desertificazione, al fine di mitigarne gli effetti e quando possibile correggerli.

## **1.5 Scopo della tesi**

Questa tesi si pone come obiettivo principale il monitoraggio della salinità in un'area costiera affetta da intrusione salina e quindi caratterizzata da alti valori salini nella falda, ponendo l'attenzione su vari aspetti:

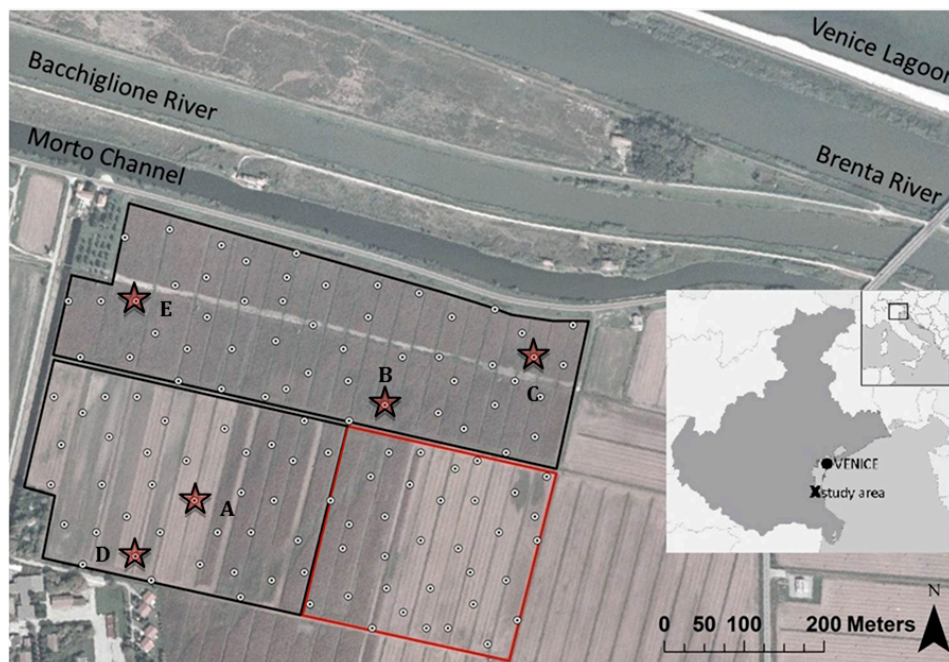
- la variabilità della salinità lungo il profilo verticale del suolo in cinque stazioni con caratteristiche del suolo molto diverse tra loro;
- l'andamento stagionale della salinità lungo i profili di tali stazioni ;
- la relazione tra la salinità della soluzione circolante del suolo e la conducibilità elettrica apparente effettuata in continuo da sonde resistive collocate nell'area a diverse profondità.



## 2 MATERIALI E METODI

### 2.1 Area di studio

L'area di studio presa in esame è situata a Ca' Bianca di Chioggia ( $12^{\circ}13'55.218''E$ ;  $45^{\circ}10'57.862''N$ ), a sud della Laguna di Venezia e a circa 5 km ad ovest del mare Adriatico. Attualmente il territorio giace a quote fino a 4 m sotto il livello del mare ed è utilizzato per fini agricoli. Lo smaltimento delle acque, altrimenti presenti nel territorio, è garantito da una fitta rete di canali di scolo e bonifica, chiaviche ed impianti idrovori. L'area in questione, prima sede di paludi e canneto, è stata interessata da numerosi interventi di bonifica durante il 1900, che ne hanno reso possibile l'uso agricolo. Essendo situata a quote inferiori al livello del mare, quest'area risulta fortemente coinvolta dal fenomeno della contaminazione salina, che raggiunge anche i 20 m di profondità, e deriva principalmente dall'intrusione dell'acqua di mare proveniente dalla vicina laguna. Il primo acquifero confinato di acqua dolce è compreso tra i 45 e i 50 m di profondità sotto il livello del mare (De Franco et al., 2009). Indagini geomorfologiche a scala di bacino hanno evidenziato la presenza di depositi sabbiosi affioranti (paleoalvei), costituiti da sedimenti fluviali e deltizi.



*Figura 2.1* - L'area di studio localizzata a Ca' Bianca, Chioggia, VE. In rosso sono indicate le 5 stazioni di monitoraggio.

### **2.1.1 Caratterizzazione del suolo dell'area**

L'area è stata caratterizzata tramite analisi chimiche e fisiche del suolo eseguite in più punti, con tecniche geoelettriche, e mediante lo studio di carte storiche e foto aeree.

#### **2.1.1.1 La selezione dei punti di monitoraggio per le analisi del suolo**

Nel 2010 il sito di studio è stato campionato in modo disturbato in 120 punti (a quattro profondità diverse 0-15; 15-45; 45-80; 80-120 cm) per l'analisi delle principali caratteristiche chimico-fisiche dell'area. Lo schema di campionamento è stato ottimizzato mediante l'uso dell'algoritmo geostatistico "Simulated Spatial Annealing" (SSA), utilizzando come informazione ausiliaria la conducibilità elettrica apparente del suolo ( $EC_a$ ). La  $EC_a$  è misurata mediante uno strumento a induzione elettromagnetica, l'elettromagnetometro CMD-1 della GF Instruments, che ha rilevato i dati alle profondità da 0 a 75 cm e da 0 a 150 cm. Sono stati considerati due profili di suolo: topsoil (strato 0-40 cm) e subsoil (strato 40-80 cm), in modo da coprire una profondità interessata dallo sviluppo radicale del mais e da eventuali oscillazioni della falda superficiale.

Successivamente, in base ai risultati ottenuti, l'area è stata divisa in cinque aree omogenee, in ognuna delle quali è stata predisposta una stazione di misura per i rilievi in campo.

L'analisi del suolo di Cà Bianca, effettuata durante un precedente lavoro, ha permesso di determinare i seguenti parametri:

- la tessitura, ottenuta tramite granulometria laser (Mastersizer 2000, Malvern Instruments);
- la conducibilità elettrica del suolo, su un estratto suolo-acqua 1:2 (Rhoades et al. 1999);
- il pH, misurato su un estratto suolo-acqua 1:2; (Ministero per le Politiche Agricole, 1999);
- il contenuto di C, N, S totale, ottenuto tramite analizzatore elementare CNS (Vario Macro, Elementar), il cui funzionamento si basa sul metodo Dumas (1831);

- i carbonati totali, espressi come  $\text{CaCO}_3$ ;
- la concentrazione di carbonio organico (C organico);
- il rapporto carbonio-azoto (C:N).

Le singole proprietà sono state statisticamente descritte in termini di valori minimi, massimi, medi, deviazione standard ed errore standard.

Dall'analisi dei dati si può notare un'elevata variabilità, che può essere dedotta sia dai valori dell'errore standard che dalla grande differenza esistente tra massimi e minimi rilevati per ciascun fattore.

**Tabella 2.1** - Proprietà chimiche e fisiche medie del suolo di Ca' Bianca

Profondità	Sabbia	Limo	Argilla	C totale	N Totale	S Totale	CaCO <sub>3</sub>	C organico	C:N	EC <sub>1:2</sub> dS m <sup>-1</sup>	pH
TOPSOIL (0-40 cm)											
Minimo	13.06	13.91	1.79	4.41	0.17	0.09	0.28	1.37	7.27	0.20	4.46
Massimo	84.29	61.55	33.63	22.28	1.55	0.91	27.51	22.24	122.72	2.45	8.29
Media	39.52	43.59	16.89	10.78	0.77	0.43	10.78	9.51	17.81	0.67	6.80
Dev. St.	12.24	6.77	6.31	4.77	0.36	0.22	8.03	5.51	21.31	0.32	1.05
Err. St.	1.11	0.61	0.57	0.70	0.05	0.03	1.18	0.81	3.14	0.03	0.10
SUBSOIL (40-80 cm)											
Minimo	12.95	7.06	0.85	2.20	0.07	0.04	0.33	0.10	0.96	0.18	3.75
Massimo	92.09	56.62	35.09	30.51	1.74	1.64	29.33	26.99	156.72	8.42	8.32
Media	54.24	33.52	12.24	11.81	0.76	0.66	9.16	10.85	17.98	2.50	6.40
Dev. St.	16.51	10.54	7.17	7.65	0.50	0.44	8.19	7.78	23.26	1.76	1.17
Err. St.	1.76	1.12	0.76	1.18	0.08	0.07	1.28	1.23	3.68	0.16	0.11
MEDIA (0-80 cm)											
Minimo	11.89	7.06	0.32	2.20	0.07	0.04	0.24	0.10	0.96	0.18	3.75
Massimo	92.09	62.51	35.09	30.51	1.74	1.64	32.22	26.99	156.72	8.42	8.32
Media	44.35	40.15	15.50	11.18	0.77	0.51	10.34	10.01	17.93	1.28	6.72
Dev. St.	11.81	7.27	5.40	4.91	0.35	0.28	7.21	5.24	18.18	0.85	0.99
Err. St.	1.07	0.66	0.49	0.69	0.05	0.04	1.02	0.74	2.57	0.08	0.09

Una più approfondita analisi delle proprietà chimico-fisiche del sito porta ad una caratterizzazione generale dell'area che può essere riassunta nei seguenti punti:

- Tessitura: il suolo è costituito da una miscelanza equilibrata di sabbia, limo e argilla: tali suoli sono denominati "franchi". Osservando la tabella è possibile notare che il valore della sabbia nello strato più profondo (subsoil) risulta circa del 15% più alto rispetto allo strato superficiale, arrivando a una media di 54.24%. L'aumento della percentuale di sabbia va a discapito di quella di limo e argilla. Per quanto riguarda il limo, si passa da valori medi del 43% per lo strato superficiale, al 33% per quello più profondo. Nel contenuto di argilla non si osservano invece grandi variazioni: si va dal 17% per il topsoil al 12% per il subsoil. Mentre il suolo superficiale è classificato come "franco", la parte più profonda, in conseguenza dell'aumento di sabbia, è definita "franco sabbiosa".

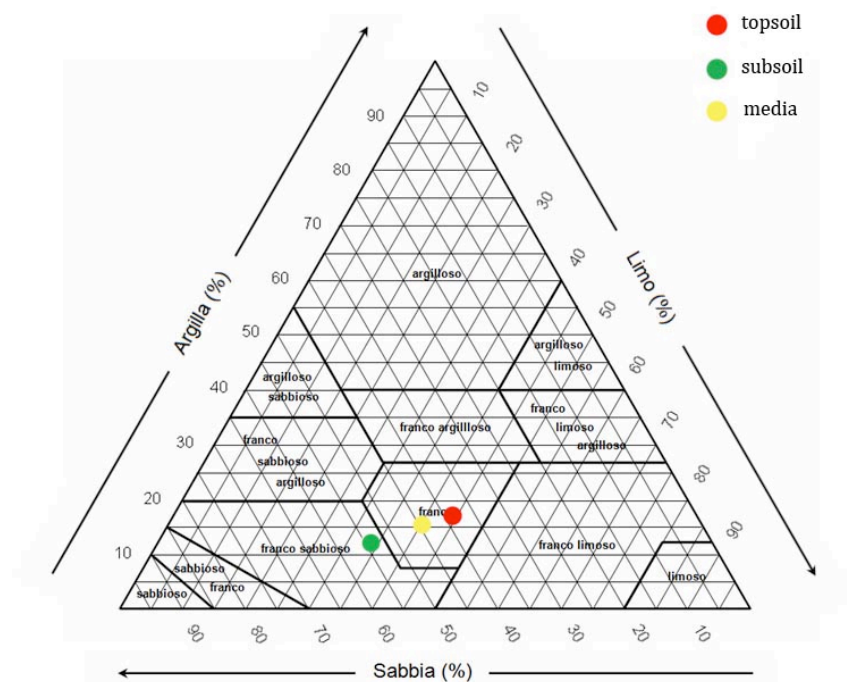


Figura 2.2 - Caratteristiche medie di tessitura del sito suddiviso in topsoil, subsoil e media.

Una forte eterogeneità nella distribuzione spaziale della tessitura si può notare anche dalla mappa a) nella figura 2.3, in cui viene illustrata la percentuale di sabbia in relazione ai paleoalvei. Come si può vedere, nel topsoil, le concentrazioni maggiori di sabbia sono state rilevate proprio lungo i paleoalvei, indicati dalle linee blu e verdi: in queste zone la percentuale di sabbia arriva anche al 90%.

- Conducibilità elettrica: l'analisi statistica dei dati ha evidenziato una conducibilità media di  $1.28 \text{ dS m}^{-1}$ , che nella tabella relativa alla classe di salinità corrisponde a terreni moderatamente salini (EC 1:2 compresa tra 1 e 2).

Nelle aree in cui è presente, la salinità risulta più alta negli strati più profondi rispetto a quelli superficiali e i valori più alti si riscontrano nei suoli ad elevato contenuto di sostanza organica, caratteristica tipica di suoli di aree palustri bonificate (Arpa Veneto, 2012).

Lo strato superficiale, compreso tra 0 e 40 cm, presenta valori medi di salinità di  $0.67 \text{ dS m}^{-1}$ , con un minimo di  $0.180$  e un massimo di  $2.447$ , e si colloca, in media, nella fascia leggermente salina (EC 1:2 compresa tra 0.4 e 1). Per quanto riguarda la fascia compresa tra i 40 e gli 80 cm, il valore medio è di  $2.5 \text{ dS m}^{-1}$ , con valori massimi che qualche volta superano gli  $8 \text{ dS m}^{-1}$  caratteristici di suoli estremamente salini.

I valori più bassi di salinità si trovano quindi nelle zone franco sabbiose, maggiormente

permeabili all'acqua e quindi più lisciviabili.

La mappa b), rappresentata nella figura 2.3, mostra la distribuzione di concentrazione della salinità nel topsoil e, anche in questo caso, come per i dati tabellari, la distribuzione risulta abbastanza ampia, con concentrazioni saline comprese all'interno dell'intervallo 0-2.56 dS m<sup>-1</sup>. Dal confronto tra la mappa della salinità con quella della tessitura viene quindi confermato come le aree poco saline tendano a concentrarsi nei paleovalvei.

I sali solubili comunemente presenti nei suoli salini sono cloruri e solfati di sodio, calcio e magnesio.

*Tabella 2.2* - Classificazione agronomica dei terreni in base alla loro conducibilità elettrica (dS m<sup>-1</sup>) (Arpa Veneto, 2012).

Classi	EC1:2 dS/m
non salino	≤ 0.4
leggermente salino	0.4 - 1
moderatamente salino	1 - 2
molto salino	2 - 5
estremamente salino	>5

- pH: sulla base di valori convenzionalmente attribuiti, si individuano le seguenti classi di pH del suolo:

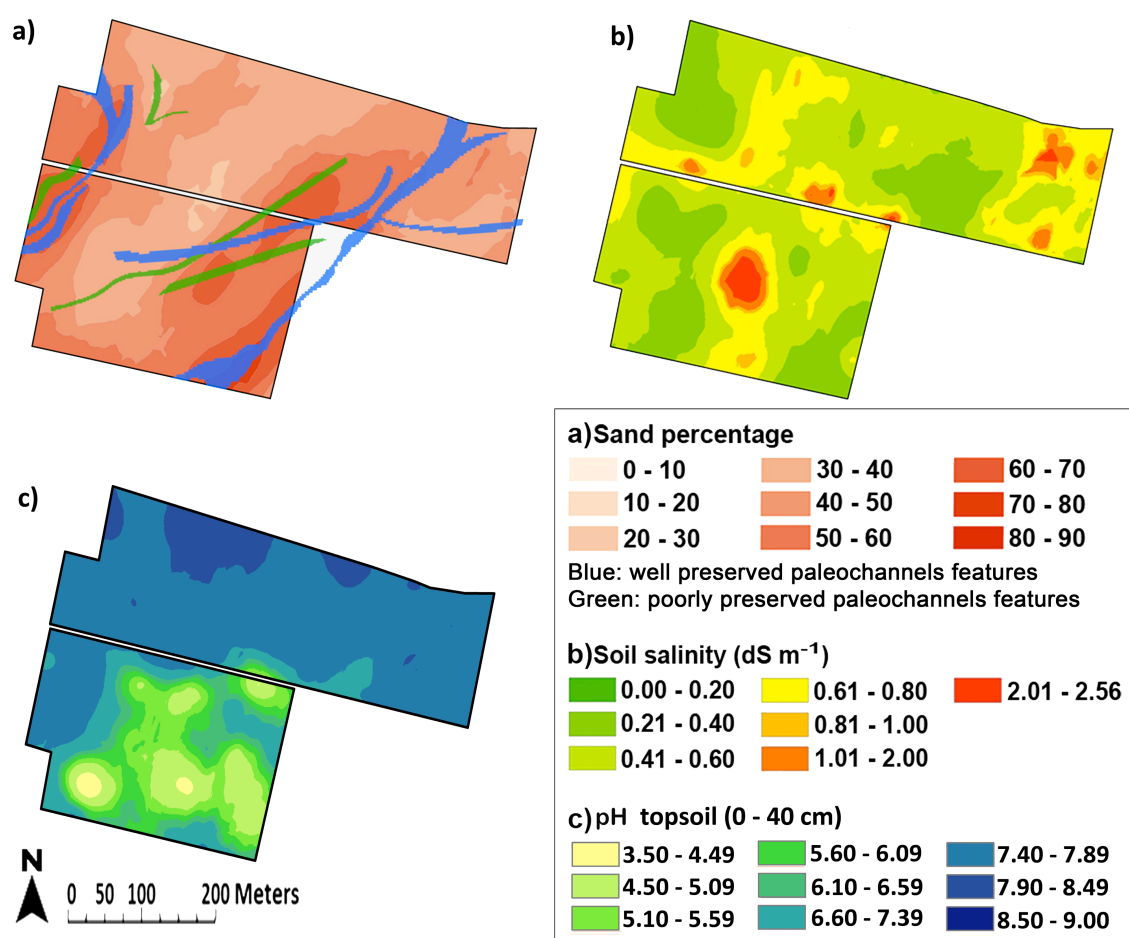
*Tabella 2.3* - Classificazione agronomica dei terreni in base al pH (Giardini, 2000)

Classi di pH	pH	
	tra	e
peracidi	<	4.60
acidi	4.60	5.20
moderatamente acidi	5.30	5.90
subacidi	6.00	6.60
neutri	6.70	7.30
subalcalini	7.40	8.00
moderatamente alcalini	8.10	8.70
alcalini	8.80	9.40
peralcalini	>	9.40

Dai risultati ottenuti si osserva che il valore medio di pH del suolo (6.72) corrisponde ad un pH neutro (tab. 2.3), con valori di massimo e minimo che però si scostano parecchio dalla neutralità, finendo in alcuni casi all'interno degli intervalli di pH estremamente acido (3.75) o moderatamente alcalino (8.3). Questa forte variabilità può essere collegata alle concentrazioni di carbonato di calcio e sostanza organica, infatti i suoli con un alto contenuto di carbonato di calcio hanno un pH moderatamente alcalino (tra 7.5 e 8),

mentre quelli in cui è presente un'abbondante quantità di sostanza organica sono prevalentemente acidi.

La mappa c), rappresentata nella fig. 2.3 di seguito, mostra la variabilità del pH nel topsoil: da questa si può vedere che anche per le classi di pH esiste una certa variabilità spaziale, con una prevalenza di terreni acidi nella parte bassa, rappresentati con colori tendenti al giallo, e terreni prevalentemente alcalini, rappresentati da colori più scuri, nella parte alta della mappa.



*Figura 2.3* - Rappresentazione della variabilità di alcuni parametri nell'area di studio. Nella mappa a) sono indicate le percentuali di sabbia e la localizzazione dei paleoalvei; nella mappa b) viene rappresentata la salinità ( $\text{dS m}^{-1}$ ); nella mappa c) si può osservare la variabilità del pH.

- Carbonio totale: la quantità di questo elemento lungo il profilo è abbastanza stabile; il suo contenuto è dell'11.18%, un buon valore per quanto riguarda un terreno agrario. Il carbonio viene in seguito descritto nelle sue due forme: carbonio organico e carbonio inorganico (carbonato di calcio).

- Carbonato di calcio: normalmente presente nei terreni agrari; il suo contenuto dipende soprattutto dall'origine geologica e dall'ambiente climatico.

Un terreno si definisce calcareo se il carbonato di calcio si trova in misura superiore al 20% (Giardini, 2002).

Il terreno analizzato ne risulta ben dotato in percentuale: il valore medio corrisponde infatti al 10.34%, con valori di minimo e massimo che oscillano fra lo 0.24% e il 29.33%.

*Tabella 2.4* - Classificazione dei terreni in base alla percentuale di  $\text{CaCO}_3$  (Giardini, 2002).

Terreno	Calcare %
povero	< 2.5
mediamente dotato	2.5 - 10
ben dotato	10 - 15
ricco	15 - 25
eccessivamente dotati	> 25

- Carbonio organico: il contenuto di carbonio organico nel suolo è in stretta relazione con quello della sostanza organica, anche se la composizione di quest'ultima presenta un elevato grado di variabilità. Si possono individuare quattro componenti principali: i residui vegetali ed animali, gli organismi viventi, le sostanze facilmente degradabili e le sostanze stabili.

L'alto contenuto di carbonio organico osservato (10.85% nel subsoil) rappresenta una conseguenza diretta dell'origine paludosa di questi terreni, provenienti dalla bonifica di aree quasi completamente sommerse dall'acqua e ricoperte da materiale vegetale.

La presenza nel substrato di orizzonti organici e di orizzonti minerali estremamente plastici rende l'area particolarmente soggetta al fenomeno della subsidenza.

- Azoto totale: nel terreno l'azoto si trova sia in forma organica, sia in forma inorganica o minerale. La forma organica non è direttamente utilizzabile dalle piante. Nel tempo, attraverso il processo di mineralizzazione, l'azoto organico viene via via trasformato in azoto ammoniacale e in seguito in azoto nitrico (assorbibile dalle piante).

In questo caso, i terreni franco sabbiosi caratterizzati da elevata macro porosità, elevata mineralizzazione della sostanza organica ed elevata lisciviazione dei sali, presentano un contenuto di azoto più ridotto di quello dei terreni di medio impasto e di quelli

tendenzialmente argillosi. Dalle analisi emergono valori medi di azoto totale pari allo 0.77%, con piccole oscillazioni nelle diverse aree e lungo il profilo: il terreno viene quindi classificato come povero in azoto.

*Tabella 2.5* - Classificazione agronomica dei terreni in base alla concentrazione di azoto totale (Giardini, 2002).

Terreno	Azoto totale g kg <sup>-1</sup>
povero	< 1
mediamente dotato	1 - 1.5
ben dotato	1.5 - 2.2
ricco	2.2 - 5
eccessivamente dotato	> 5

- Zolfo totale: lo zolfo nel suolo è presente sia in forma organica che inorganica.

La frazione che entra nei composti organici costituisce, in genere, la maggiore riserva del nutriente nel suolo (75-90%). Il rapporto C:N:S nella sostanza organica è approssimativamente 125:10:1-2. (Violante, 2002)

Un terreno ben dotato possiede in genere 1-2% di zolfo; in questo caso si osservano valori medi dello 0.51%, che tendono ad un lieve aumento nello strato più profondo, a causa della presenza di una maggiore quantità di sostanza organica. In ambiente riducente, le reazioni ossidative della sostanza organica sono del tutto inibite e si ha come conseguenza una produzione di solfuri, con valori massimi di concentrazione che arrivano all'1.64%. (Giardini, 2002).

- C/N: rappresenta la relazione esistente tra carbonio ed azoto in matrice organica, ed è un indice che aiuta a capire lo stato di fertilità di un terreno.

Un valore alto, in questo caso di 17.93%, indica un eccessivo tenore in sostanza organica indecomposta a causa di un'umificazione stentata per carenza di azoto (valore medio 0.77%).

*Tabella 2.6* - Classificazione agronomica dei terreni in base al rapporto C/N

Valutazione	C/N
basso	0 - 9
medio	9 - 11
alto	> 11



## 2.2 Le analisi di campo

In questo lavoro vengono presi in considerazione e analizzati i dati riguardanti le analisi chimico-fisiche del suolo e delle acque di cinque profili superficiali di suolo, comprensive sia della zona vadosa che di quella satura.

### 2.2.1 Localizzazione delle stazioni di monitoraggio

Le cinque stazioni di monitoraggio sono state disposte all'interno di altrettante aree omogenee in cui è stato suddiviso l'appezzamento. Le aree sono state selezionate utilizzando il software MZA – Management Zones Analyst (University of Missouri/Columbia, 2000).

MZA crea delle potenziali zone omogenee utilizzando una *unsupervised fuzzy classification* (classificazione fuzzy non supervisionata) per un'area d'interesse, su due o più classi di valori, i quali descrivono le caratteristiche intrinseche dell'area (es. tessitura, pH, salinità).

In questo studio, come detto in precedenza, la classe di valori utilizzata è la conducibilità elettrica apparente del suolo, che ha permesso di selezionare le cinque stazioni di monitoraggio in corrispondenza di alcuni dei 120 punti in cui era stato campionato il suolo (Scudiero et al., 2011).



Figura 2.4 - Rappresentazione schematica delle cinque aree omogenee in cui è stata suddivisa l'area

## 2.2.2 I suoli delle stazioni di monitoraggio

In base ai risultati ottenuti dall'analisi nei 20 punti di campionamento, l'area è stata divisa in cinque zone, in ognuna delle quali è stata predisposta una stazione di misura per i rilievi in campo.

La caratterizzazione dei suoli in queste cinque aree è riassunta nella tabella seguente:

Tabella 2.7 - Proprietà chimiche e fisiche del suolo delle cinque stazioni di monitoraggio

Stazione	Profondità	Sabbia	Limo	Argilla	C totale	SOC	CaCO3	Φ (porosità)
		----- % -----			-----			
A	10	39.58	40.97	19.45	15.10	13.72	11.50	0.59
A	30	42.27	41.65	16.08	15.90	15.84	0.50	0.62
A	50	17.78	54.57	27.66	4.91	4.79	1.00	0.59
A	70	17.17	50.74	32.09	3.70	3.14	4.67	0.61
B	10	51.86	37.21	10.94	6.46	5.61	7.08	0.56
B	30	49.22	38.01	12.76	6.82	5.96	7.17	0.57
B	50	92.09	7.06	0.85	4.68	2.73	16.25	0.50
B	70	88.96	8.36	2.69	3.84	0.36	29.00	0.47
C	10	26.87	47.74	25.40	10.25	8.75	12.50	0.69
C	30	32.35	49.18	18.47	9.44	7.97	12.25	0.64
C	50	45.04	39.69	15.27	23.51	22.89	5.17	0.85
C	70	45.04	39.69	15.27	29.83	29.45	3.17	0.85
D	10	39.28	47.64	13.09	20.81	20.80	0.08	0.65
D	30	27.06	50.69	22.25	20.50	20.41	0.79	0.67
D	50	55.95	32.98	11.06	22.00	21.64	3.00	0.53
D	70	55.95	32.98	11.06	22.00	21.64	3.00	0.53
E	10	64.66	23.47	11.88	4.36	1.29	25.61	0.41
E	30	61.14	26.69	12.17	4.43	1.41	25.16	0.41
E	50	82.47	12.45	5.08	30.51	26.99	29.33	0.48
E	70	82.47	12.45	5.08	30.51	26.99	29.33	0.44

Dall'analisi dei dati si può osservare un'elevata eterogeneità, sia all'interno di ogni singola stazione (lungo il profilo verticale), che tra le diverse stazioni, collocate in zone abbastanza distanti tra loro e, in alcuni casi, proprio lungo i paleoalvei.

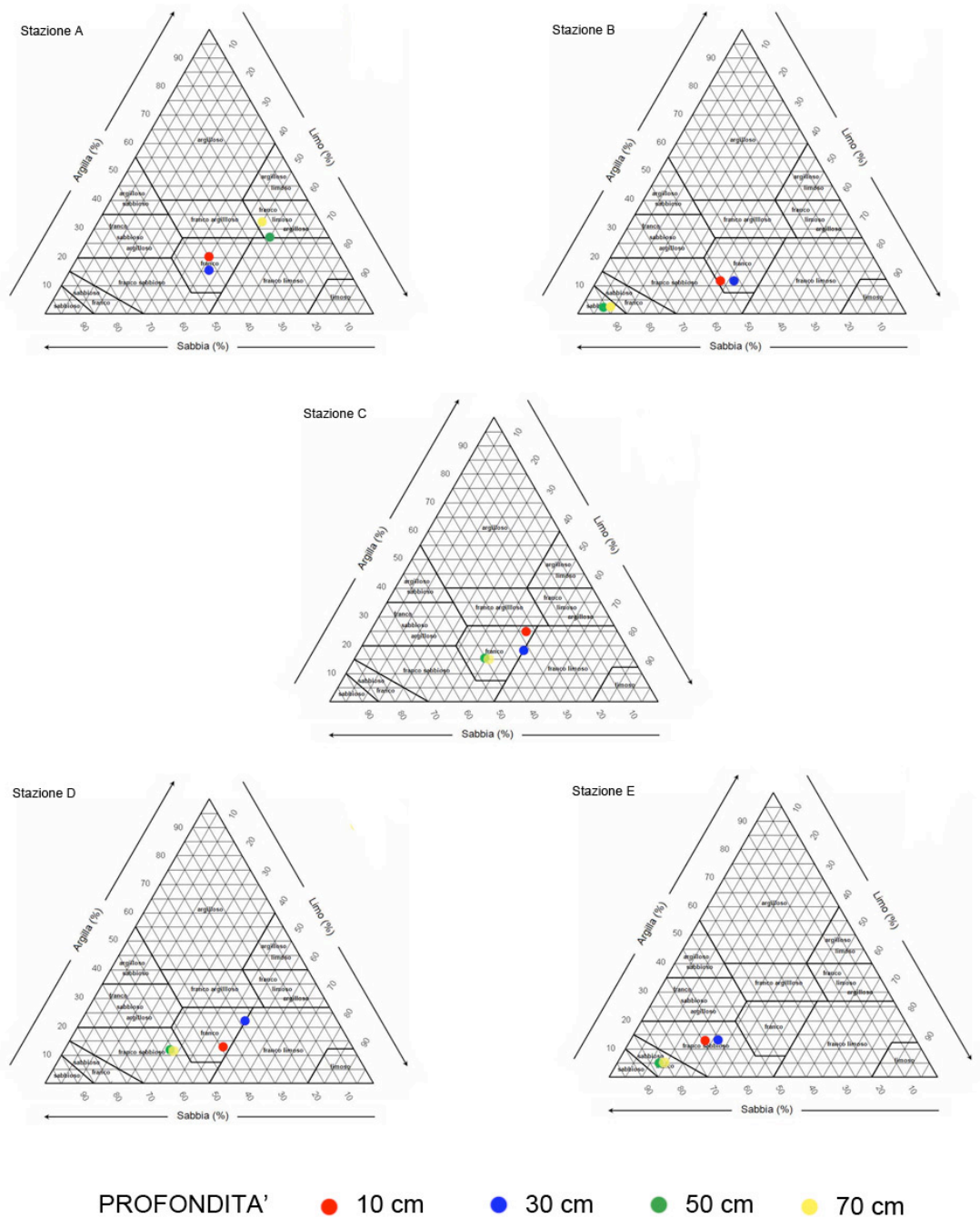


Figura 2.5 - Tessitura suddivisa per profondità delle stazioni

Le stazioni A, C e D sono caratterizzate da una mescolanza piuttosto equilibrata di sabbia, limo e argilla, con lievi cambiamenti lungo il profilo verticale, che portano a un differenziamento nella classificazione dei vari strati. In particolare, per quanto riguarda le profondità di 10 e 30 cm, il terreno della stazione A risulta essere franco, quello nella stazione C franco/franco-limoso-argilloso e quello nella stazione D franco-limoso. Scendendo a 50 e 70 cm di profondità si osservano alcuni cambiamenti: nella stazione A

la composizione del terreno si sposta verso l'area franco-limosa-argillosa; nella stazione C verso terreni franchi e nella stazione D verso i valori caratteristici dei terreni franco-sabbiosi. Le stazioni B ed E si differenziano dalle precedenti per essere le più sabbiose, soprattutto considerando i due strati più profondi, dove la percentuale di sabbia, nella stazione B, arriva a superare il 90%.

Anche per quanto riguarda il contenuto di carbonio organico e carbonati, si può osservare una forte variabilità, sia verticale che tra le stazioni: si va da terreni molto ricchi in carbonio organico, caratteristici della stazione D, nella quale si ha un valore in SOC compreso tra 20 e 22% per tutti i profili, a stazioni complessivamente povere, come la B, in cui il contenuto medio in sostanza organica è del 3-4%.

L'alto contenuto in carbonio organico presente nella maggior parte delle stazioni, come detto in precedenza, rappresenta una conseguenza diretta dell'origine paludosa di questi terreni, provenienti dalla bonifica di aree quasi completamente sommerse dall'acqua e ricoperte da materiale vegetale.

Considerando invece il contenuto in carbonati, la stazione più ricca risulta essere la E, con valori compresi tra il 25 e il 30%, tipici di terreni calcarei; tutte le altre stazioni, ad eccezione dello strato a 70 cm della stazione B, risultano esserne povere o mediamente dotate (Giardini, 2002).

### 2.3 Descrizione delle stazioni di monitoraggio

Le stazioni A, B e C sono state installate nell'agosto 2010; in seguito, da metà maggio 2011, si è ritenuto opportuno completare il monitoraggio con due stazioni aggiuntive: D ed E, rispettivamente in una zona moderatamente salina e in una non salina.

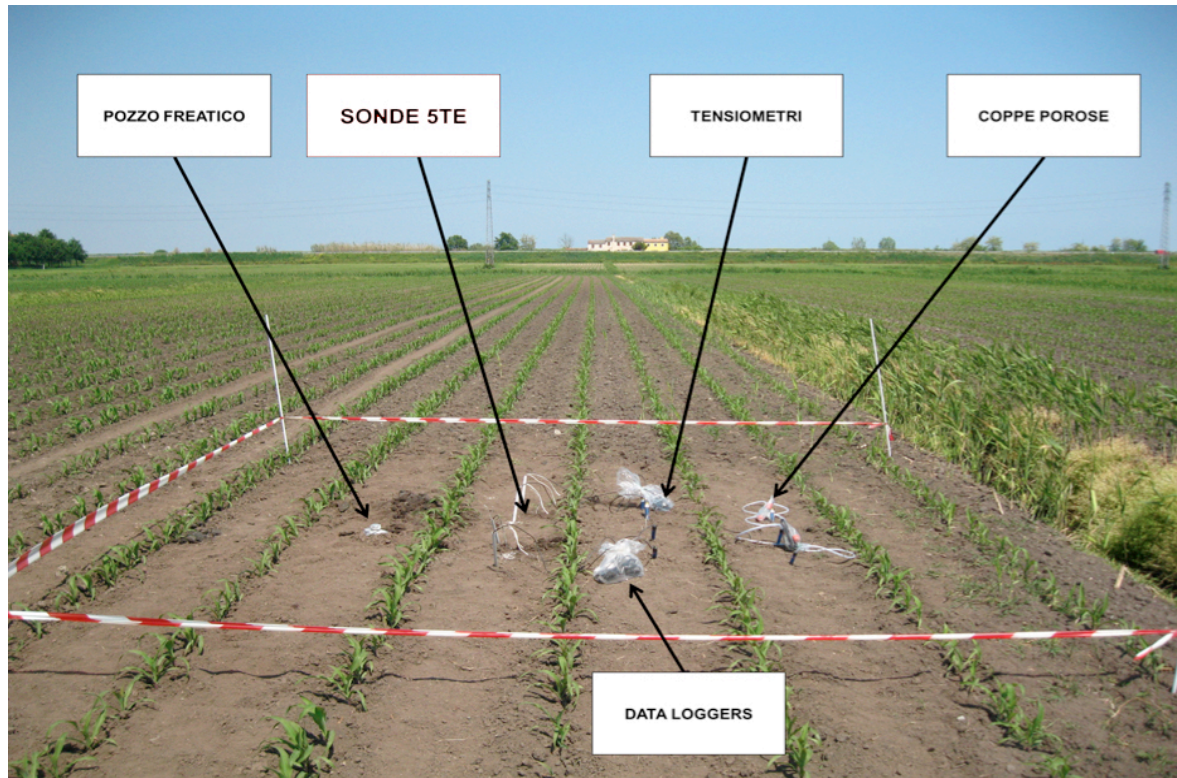


Figura 2.6 - Posizionamento degli strumenti in una delle 5 stazioni di monitoraggio (Stazione A)

Ognuna delle cinque stazioni è stata attrezzata con la seguente strumentazione:

- quattro sonde 5TE della Decagon Devices, poste alle profondità di 10, 30, 50, 70 cm, per misurare la costante dielettrica del suolo (e da questa stimare l'umidità volumetrica del suolo), la conducibilità elettrica e la temperatura;
- un datalogger EM50 della Decagon Devices, per la registrazione dei dati provenienti dalle sonde 5TE;
- quattro tensiometri T8 della UMS, posti alle profondità di 10, 30, 50, 70 cm, per misurare il potenziale matriciale del suolo (hPa);
- un datalogger DL6-TE della Delta-T Devices, per la memorizzazione dei dati provenienti dai 4 tensiometri;
- quattro microlisimetri SK20 della UMS, posti alle profondità di 10, 30, 50, 70 cm, per campionare l'acqua trattenuta dal suolo alle diverse profondità;

- una sonda MPS-1 della Decagon Devices, posta alla profondità di 10 cm, per la misura del potenziale matriciale anche in condizioni di suolo molto secco;
- un piezometro, per misurare l'altezza di falda e campionarne l'acqua.

Ogni strumento è stato programmato tramite il proprio datalogger di riferimento per effettuare misure ad intervalli regolari di un'ora; per ognuno dei parametri indagati si sono dunque ottenuti 24 valori giornalieri.

Le sonde 5TE sono state posizionate alle profondità di 10, 30, 50, e 70 cm dalla superficie del terreno, cercando di disturbare il meno possibile il terreno circostante.

Come detto in precedenza, tali sonde permettono di misurare contemporaneamente il contenuto d'acqua volumetrico, la conducibilità elettrica e la temperatura del suolo. Il contenuto volumetrico d'acqua ( $\theta$ ) viene rilevato attraverso la misura della costante dielettrica del suolo: l'elevata permittività dielettrica dell'acqua rende la costante dielettrica apparente ( $\epsilon_a$ ) dei suoli umidi fortemente dipendente dal contenuto idrico. La permittività apparente  $\epsilon_a$  viene poi correlata al contenuto volumetrico d'acqua  $\theta$  mediante la relazione empirica di Topp (valida per un'ampia varietà di suoli agricoli minerali).

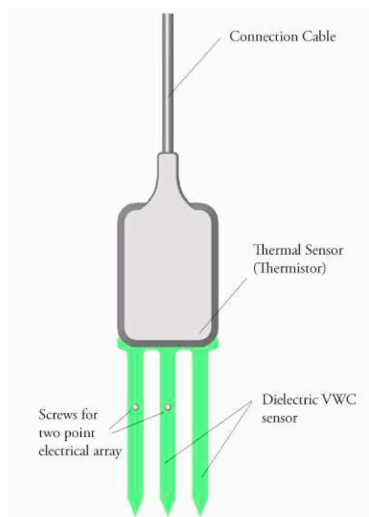
$$\theta_v = 4.3 \cdot 10^{-6} \epsilon_a^3 - 5.5 \cdot 10^{-4} \epsilon_a^2 + 2.92 \cdot 10^{-2} \epsilon_a - 5.3 \cdot 10^{-2} \quad \text{eq. 2.1}$$

Il datalogger (EM50 della Decagon Devices), effettuate le opportune correzioni e conversioni, registra i valori di contenuto idrico in  $\text{m}^3/\text{m}^3$ .

Ulteriori studi (Gardner et al., 2000) hanno però dimostrato che la dipendenza delle proprietà dielettriche del suolo dal contenuto idrico è più complessa, e che è necessaria una calibrazione per ciascun suolo, specialmente per quelli che presentano elevata salinità. Nel caso in esame quindi, è stata effettuata (precedentemente a questo lavoro di tesi) una calibrazione della sonda, sviluppando un modello *ad hoc* per i suoli presenti nell'area indagata.

Il *range* per questo sensore va da  $\epsilon_a = 1$  per l'aria a  $\epsilon_a = 80$  per l'acqua.

La misura della conducibilità elettrica avviene invece applicando una corrente alternata attraverso due elettrodi posti lungo le aste dello strumento e misurando la resistenza tra esse.



*Figura 2.7 - Rappresentazione schematica della sonda Decagon 5TE e posizione dei sensori per le misure di VWC, temperatura e conducibilità (© 2007-2010 Decagon Devices).*

Nel caso di misure di soluzioni acquose, il valore della conducibilità è strettamente legato alla concentrazione di ioni e quindi alla salinità: più ioni sono presenti nella soluzione, maggiore risulta la sua conducibilità (il range dello strumento è compreso tra 0-23  $\text{dS m}^{-1}$ ).

L'elemento sensibile per la misura della temperatura infine è costituito da un termistore, programmato per esprimere i valori della temperatura del suolo in  $^{\circ}\text{C}$ ; si trova sulla parte superiore della sonda e il range va da  $-40$  a  $50$   $^{\circ}\text{C}$ .

I quattro tensiometri, posizionati alle profondità di 10, 30, 50 e 70 cm, vengono inseriti nel terreno attraverso un apposito foro, facendo attenzione che la coppa porosa sia ben aderente al suolo circostante; solo in questo modo il tensiometro potrà funzionare correttamente.

I tensiometri offrono un sistema molto preciso per la misura del potenziale idrico, non sono influenzati dal contenuto salino e offrono misure accurate nell'intervallo compreso tra 0 e 85 kPa.

Il movimento dell'acqua nel suolo dipende direttamente dalla forza con cui l'acqua è trattenuta dal terreno che la circonda; in condizioni naturali l'acqua si muove da zone in cui il potenziale è maggiore verso zone in cui il potenziale è minore. Oltre che dalle precipitazioni e dell'evapotraspirazione, il movimento dell'acqua è influenzato anche dal tipo di suolo (granulometria), dalla presenza di crepe, dalla compattazione e dalla presenza di piante.



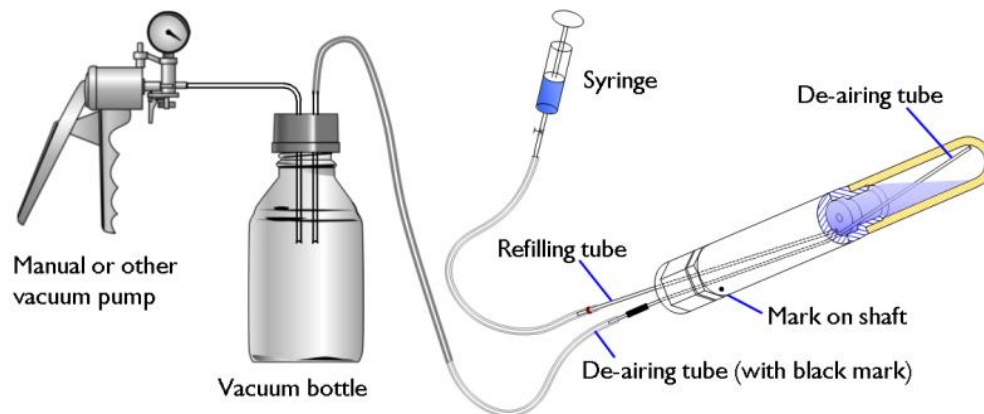


Figura 2.8 - Schema di un tensiometro, del metodo di ricarica e del sistema per la raccolta dei campioni d'acqua (© UMS GmbH München, 2011)

Il principio di funzionamento si basa sul fatto che l'acqua presente all'interno del tensiometro si pone in equilibrio con quella presente nel terreno, creando una tensione. Via via che il terreno si asciuga, l'acqua esce dal tensiometro creando una depressione che sarà misurata dal trasduttore di pressione e memorizzata dal datalogger.

Per un corretto funzionamento nel tempo, è necessario ripristinare periodicamente il livello dell'acqua al suo interno per impedire il fenomeno di cavitazione (formazione di bolle d'aria).

I tensiometri sono collegati ad un datalogger DL6-TE per la memorizzazione oraria delle tensioni alle varie profondità.

La sonda MPS-1, posizionata esclusivamente alla profondità di 10 cm, misura il potenziale dell'acqua del terreno tramite la misura della capacità elettrica.

La matrice di ceramica di cui è costituita viene messa in equilibrio con il suolo e, poiché le due superfici (ceramica e suolo) sono in equilibrio, la misura della permittività dielettrica sul materiale noto sarà uguale a quella del suolo circostante. La costante dielettrica dei dischi ceramici porosi è altamente dipendente dalla quantità d'acqua presente nei pori della ceramica.

Anche in questo caso, i valori di potenziale, espressi in kPa, vengono registrati ad intervalli orari tramite l'utilizzo di un datalogger (EM50 della Decagon Devices).

Al momento dell'installazione, affinché la matrice porosa risulti ben a contatto con il suolo circostante, è opportuno creare un impasto umido con il terreno di scavo e farlo aderire il più possibile alla sonda, il cui range di funzionamento va da -10 a -500 kPa.



Anche i microlisimetri, come i tensiometri, sono stati sistemati alle medesime quattro profondità di 10, 30, 50 e 70 cm e inseriti nel terreno attraverso un apposito foro, facendo attenzione, anche in questo caso, che la coppa porosa sia ben aderente in modo da creare un continuum tra il microlisimetro e il suolo circostante.

Il microlisimetro a suzione è uno strumento utilizzato per prelevare e studiare l'acqua interstiziale presente nel suolo.

In questo caso, la soluzione circolante è composta dall'acqua trattenuta nei pori del terreno e da tutti i sali in essa contenuti.

L'analisi delle soluzioni permette di determinare salinità, pH e disponibilità di elementi nutritivi.

Per valutare eventuali gradienti è utile posizionare i microlisimetri a diverse profondità; questo permette di poter confrontare i dati e determinare la direzione verso cui si muove la concentrazione salina.

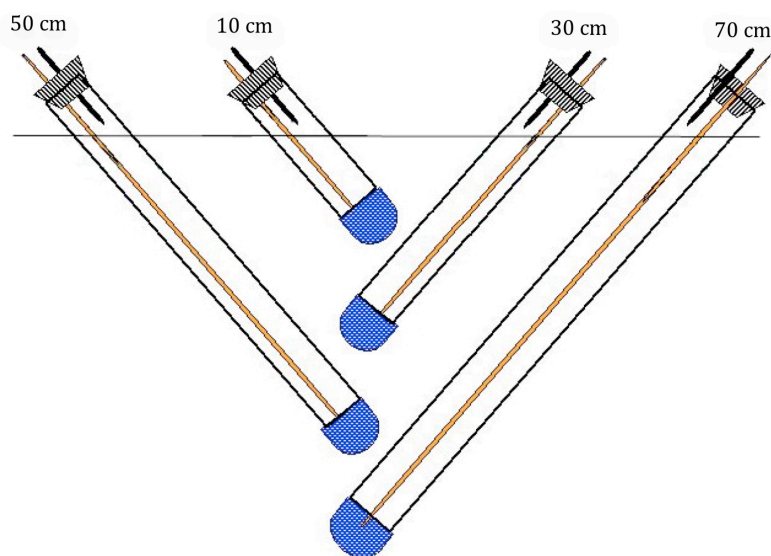


Figura 2.9 - Configurazione dei tensiometri e dei microlisimetri nel terreno: sono posizionati in modo da effettuare le misure ed i prelievi della soluzione circolante lungo lo stesso profilo verticale di terreno.

Per estrarre la soluzione dal suolo, occorre applicare una depressione all'interno del microlisimetro per mezzo di una pompa a vuoto: l'acqua in questo modo penetra attraverso la punta di ceramica porosa e arriva in superficie dove viene raccolta in una bottiglia.

Per il monitoraggio dell'altezza di falda e il prelievo dei campioni d'acqua, è stato installato in ogni stazione un piezometro dell'altezza di 2m.

Si tratta di piezometri a tubo aperto, costituiti da una tubazione in PVC dotata di una parte terminale forata e ricoperta da un filtro, collocato nel terreno dopo aver eseguito un foro del diametro di circa 12 cm.

Per la misura dell'altezza di falda occorre lasciare che l'acqua presente nel terreno penetri all'interno del tubo e si metta in equilibrio con esso; a questo punto si misura la profondità della superficie libera all'interno del tubo mediante un freatimetro.

### **2.3.1 Le operazioni di campo**

I prelievi dell'acqua circolante nel terreno, dell'acqua di falda e la misura del livello dell'altezza di falda sono stati effettuati con cadenza quasi bisettimanale durante l'intero periodo di studio, compreso tra agosto 2010 e agosto 2011.

Nelle venti uscite complessive sono stati prelevati un totale di 231 campioni divisi per stazione e profondità e successivamente portati in laboratorio per l'analisi.

Per ottenere l'acqua circolante occorre collegare i microlisimetri a delle bottiglie in vetro e portarli ad una pressione di  $\cong -0.8$  bar; in questo modo l'acqua viene estratta dal terreno e raccolta nelle bottiglie. Questa operazione viene eseguita tramite una pompa a vuoto, collegando ogni microlisimetro ad una bottiglia un giorno prima della data in cui è previsto il prelievo. Durante le 24 ore successive l'acqua sarà quindi estratta dal terreno e raccolta per l'analisi. Durante le operazioni di estrazione, le bottiglie sono state isolate termicamente e la soluzione, una volta raccolta, è stata conservata a basse temperature (4 °C) prima di essere analizzata chimicamente.

I dati rilevati dalle sonde e registrati dai rispettivi datalogger sono stati scaricati e memorizzati in un computer attraverso l'apposito software una volta al mese; durante questa operazione si è anche controllato il corretto funzionamento degli strumenti e sono state apportate le eventuali opportune correzioni.



*Figura 2.10* – Stazione C con le quattro bottiglie in cui viene raccolta la soluzione circolante estratta dai microlisimetri

## 2.4 Dati meteo

I dati meteo, forniti dal centro meteorologico di Teolo (PD), sono relativi alla stazione di Chioggia (località Sant'Anna) e comprendono tutti i principali parametri di riferimento delle stazioni agro-meteorologiche. Si sono resi disponibili inoltre i dati pluviometrici del pluviometro di Zennare, di proprietà del Consorzio di Bonifica Adige Bacchiglione.

## 2.5 Analisi dei dati

Le serie temporali rilevate dagli strumenti, relative alla temperatura del suolo, all'EC<sub>b</sub>, all'umidità, alla piovosità e al potenziale matriciale, sono state ordinate e suddivise in tre periodi per poter confrontare l'andamento dei parametri nelle diverse stazioni. I tre

periodi in cui è stato suddiviso l'anno di campionamenti sono intervallati tra loro dal periodo di raccolta e di semina, e possono essere distinti in:

- I° periodo (estate 2010): compreso tra il 29 luglio e il 15 ottobre 2010, durante il quale sono stati effettuati i campionamenti in cinque date successive a distanza di due settimane l'uno dall'altro nelle stazioni A, B, C;
- II° periodo (inverno 2010): compreso tra il 22 dicembre 2010 e il 21 marzo 2011, durante il quale sono stati effettuati i campionamenti in sei date successive a distanza di due settimane l'uno dall'altro nelle stazioni A, B, C;
- III° periodo (estate 2011): compreso tra il 10 maggio e il 22 settembre 2011, durante il quale sono stati effettuati i campionamenti in nove date successive, anche in questo caso distanziate di due settimane tra loro, in tutte le stazioni (A, B, C, D, E).

Tabella 2.8 - Riassunto delle date di campionamento suddivise per periodo

I° Periodo	II° Periodo	III° Periodo
10/08/10	05/01/11	17/05/11
03/09/10	21/01/11	01/06/11
16/09/10	08/02/11	13/06/11
01/10/10	18/02/11	26/06/11
15/10/10	04/03/11	10/07/11
	21/03/11	25/07/11
		10/08/11
		26/08/11
		04/09/11

I dati all'interno dei tre periodi sono stati sottoposti al test non parametrico di Kruskal-Wallis. Il test è stato proposto nel 1952 da W.H. Kruskal e W. A. Wallis e rappresenta uno dei test più potenti per verificare l'ipotesi nulla  $H_0$ , cioè se  $k$  gruppi indipendenti provengano dalla stessa popolazione e/o da popolazioni che abbiano la medesima mediana (Kruskal e Wallis 1952). Questo test è stato applicato ai dati ottenuti dalle analisi in laboratorio, di ECw, pH, anioni e cationi, considerando come fattore indipendente la "stazione".

La relazione generale delle interdipendenze esistenti tra i dati ottenuti è stata infine valutata effettuando una correlazione basata sull'analisi delle componenti principali (PCA)

su 10 variabili:  $EC_w$ , altezza di falda, contenuto idrico volumetrico, cloruri, sodio, solfati, calcio, potassio, magnesio e nitrati.

### 2.5.1 Ottimizzazione del modello di Archie

Scudiero et al. (2012) hanno recentemente introdotto una correzione per determinare l'effetto della conducibilità elettrica sulla lettura della costante dielettrica del suolo ( $\epsilon_a$ ) con la sonda 5TE della Decagon Devices, in sostituzione al modello di Topp previsto dalla casa madre dello strumento. Il loro approccio empirico ha portato allo sviluppo di un modello logaritmico per stimare il contenuto idrico volumetrico, che permette di correggere i valori di  $\epsilon_a$  in base alle letture di  $EC_a$  e della quantità di argilla, sabbia e SOC presente nel suolo:

$$\theta = \left( c' \cdot SOC + c'' + \left( d' \cdot \frac{\text{argilla}}{\text{sabbia}} + d'' \right) \cdot EC_a \right) \cdot \left( 1 + q \cdot \ln(\epsilon_a) \right) \quad \text{eq. 2.1}$$

dove  $c'$ ,  $c''$ ,  $d'$ ,  $d''$  e  $q$  sono parametri di fittaggio. La tabella 2.9 riporta i valori calibrati per tali parametri.

Tabella 2.9 - Valori sperimentali di  $c'$ ,  $c''$ ,  $d'$ ,  $d''$  e  $q$  (eq. 2.4) secondo Scudiero et al. 2012.

$c'$	$c''$	$d'$	$d''$	$q$
-0.006	-0.352	-0.009	0.02	-0.766

Inoltre, Scudiero et al. (2012), hanno messo a confronto diversi modelli per la stima di  $EC_p$ , constatando che il modello di Archie (1952) (eq. 2.2) fornisce le stime più accurate tra i modelli a confronto. Nell'intento di diminuire il numero dei parametri necessari per applicare tale modello, gli autori lo hanno riformulato ponendo  $k$  come costante ed esprimendo  $m$  ed  $n$ , rispettivamente in funzione del contenuto di carbonio organico e della sabbia (eq. 2.3).

$$EC_p = k \cdot \frac{EC_a - EC_s}{\phi^m \cdot S^n} \quad \text{eq. 2.2}$$

Hanno inoltre dimostrato che, con tale formulazione, risulta conveniente rimuovere il termine  $EC_s$  dal modello di Archie.

La modifica di Scudiero et al. (2012) risulta quindi espressa da:

$$EC_p = k \cdot \frac{EC_a}{\Phi \left( m' \cdot SOC + \frac{m'' \cdot SOC}{SOC + m'''} \right) \cdot S^{(n' \cdot sabbia + n'')}} \quad \text{eq. 2.3}$$

dove i parametri di fittaggio  $k$ ,  $m'$ ,  $m''$ ,  $n'$  ed  $n''$  assumono i valori espressi nella tabella 2.10.

Tabella 2.10 - Valori sperimentali di  $k$ ,  $m'$ ,  $m''$ ,  $n'$  ed  $n''$  (eq. 2.3), secondo Scudiero et al. 2012.

$k$	$m'$	$m''$	$m'''$	$n'$	$n''$
0.487	-0.018	4.35	0.966	0.035	-0.669

La calibrazione di Scudiero et al. (2012) è stata condotta in laboratorio sui suoli delle stazioni di monitoraggio di Ca' Bianca, in particolare sul topsoil (0-40 cm) delle stazioni A, B e C e sul subsoil (40-80 cm) delle stazioni A e B.

In questo lavoro di tesi, la legge di Archie è stata quindi calibrata sugli stessi suoli, ma alle condizioni di pieno campo.

A tal fine sono stati utilizzati i dati relativi alle analisi della conducibilità elettrica delle soluzioni circolanti (estratte con le coppe porose), ai quali sono stati accoppiati i valori di  $\epsilon_a$ ,  $EC_b$  e  $T$  (letti dalla sonda 5TE), e il potenziale matriciale (letto dai tensiometri). I valori delle sonde 5TE e dei tensiometri, rilevati con cadenza oraria, sono stati sistemati calcolando la media delle 24 ore precedenti al prelievo.

Come detto in precedenza, anche l'estrazione delle soluzioni circolanti è stata eseguita lentamente e in modo continuo nell'arco delle 24 ore precedenti alla data del prelievo, utilizzando un sistema a vuoto che ha consentito la raccolta degli estratti acquosi in bottiglie di vetro opportunamente collegate ai microlisimetri.

I valori di  $EC_p$ , utilizzati per ottenere un'informazione sui valori osservati (misurati), sono stati ottenuti estraendo la soluzione circolante da 75 campioni di suolo prelevati a diverse profondità nelle 5 stazioni.

I campioni analizzati erano suddivisi nel seguente modo:

- per la stazione A: 3 campioni per la profondità 0-20, 5 per la profondità 20-40, 8 per la profondità 40-60 e 9 per la profondità 60-80;
- per la stazione B: 4 campioni per la profondità 0-20, 7 per la profondità 20-40, 10 per la profondità 40-60 e 16 per la profondità 60-80;
- per la stazione C, 6 campioni per la profondità 0-20 e 7 per la profondità 20-40.

Per applicare la legge di Archie è stato inizialmente necessario scegliere un modello per la stima di  $\theta$ , un parametro essenziale per l'applicazione di questa legge. Si è scelto di derivare i valori di umidità volumetrica da quelli di potenziale matriciale, grazie alla conoscenza delle curve di ritenzione, disponibili per i suoli di queste stazioni; i valori ottenuti con questo metodo sono stati poi utilizzati come valori osservati di  $\theta$  e applicati sia al modello di Topp et al. (1980) che al modello di Scudiero et al. (2012).

L'ottimizzazione è stata effettuata minimizzando la devianza residua tra valori osservati e stimati, calibrando i parametri  $c'$ ,  $c''$ ,  $d'$ ,  $d''$  e  $q$ . La devianza residua è definita come la somma degli scarti quadratici, dove questi rappresentano il quadrato della differenza tra valori osservati e stimati.

Sono stati inoltre confrontati il modello classico di Archie (senza  $EC_s$ , eq. 2.4) con i parametri di default e quelli calibrati da Scudiero et al. (2012) in laboratorio (eq. 2.3):

$$EC_p = k \cdot \frac{EC_b}{\phi^m \cdot S^n} \quad \text{eq. 2.4}$$

Infine, analogamente a quanto fatto con la selezione del modello per la stima di  $\theta$ , la formulazione di Archie secondo Scudiero et al. (2012) è stata ricalibrata alla condizioni di campo, modificando i parametri di fittaggio  $k$ ,  $m'$ ,  $m''$ ,  $n'$  ed  $n''$ .

La bontà dei modelli di stima è stata valutata in base al root mean square error (RMSE) e in base al valore di  $R^2$ .

L'RMSE (eq. 2.5) offre un'indicazione quantitativa della bontà del valore stimato, in quanto è una misura dell'ordine di grandezza dell'errore, e cioè della deviazione dei valori stimati ( $S_j$ ) rispetto a quelli osservati ( $O_j$ ). Il valore ottimale per questo indice è zero, e comunque, minore è l'errore di predizione, migliore è ovviamente la predizione stessa.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (s_i - o_i)^2}{N}} \quad \text{eq. 2.5}$$



### **3. RISULTATI**

In questo capitolo vengono presentati i risultati relativi all'analisi dei dati e delle successive elaborazioni; per semplificazione si è ritenuto opportuno suddividere il lavoro in tre parti principali:

- la prima, focalizzata sull'analisi e la discussione dei dati raccolti dalle sonde e il confronto con i principali parametri che li influenzano;
- la seconda, relativa ai risultati ottenuti dall'analisi delle acque, lo studio dell'andamento spazio-temporale della salinità e il confronto tra le cinque stazioni di misura;
- la terza, basata sull'applicazione del modello di Archie.

#### **3.1 Analisi e discussione dei dati rilevati dalle sonde**

In questo paragrafo, vengono presentati gli andamenti del contenuto idrico volumetrico (VWC), della conducibilità elettrica apparente ( $EC_a$ ) e della temperatura, così come misurati dalla sonda 5TE della Decagon. I dati sono stati analizzati in base alla stazione di appartenenza e alla profondità, non considerando alcuni periodi in cui le sonde presentavano problemi di funzionamento; inoltre, per quanto riguarda le stazioni D ed E, essendo state installate solo a partire dal 17 maggio 2011, viene considerato solo l'ultimo periodo.

Visto che l'andamento della conducibilità elettrica e del contenuto idrico volumetrico sono direttamente influenzati dal contenuto idrico, i dati sono stati relazionati con l'andamento della piovosità, per evidenziare come ci sia una relazione diretta con questi parametri.

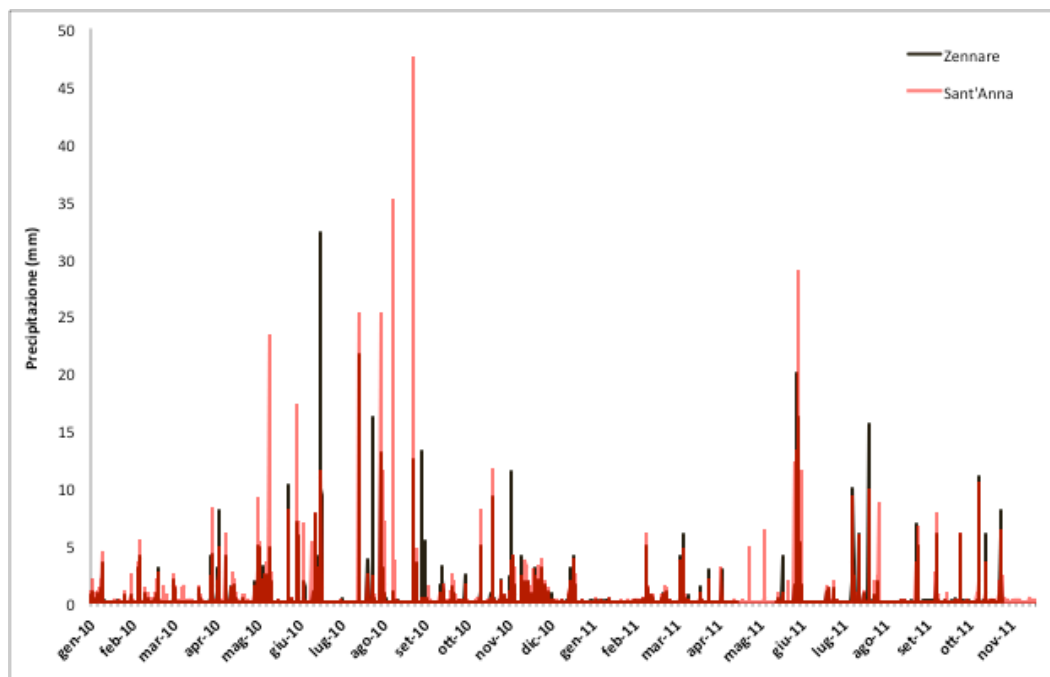


Figura 3.1 - Precipitazioni giornaliere negli anni 2010 - 2011 (mm giorno), relative alle stazioni di Zennare e S. Anna, due località poste nelle vicinanze dell'area indagata

Il grafico rappresentato in figura 3.1 illustra l'andamento della piovosità giornaliera in due stazioni meteo nei pressi dell'area indagata; per i successivi confronti è stato scelto di utilizzare il dato medio risultante, in modo da avere una buona stima degli eventi piovosi avvenuti in zona.

Da un confronto tra le due località, si può notare una buona corrispondenza degli eventi piovosi, caratterizzati però da una diversa intensità (altezza dei picchi), ad indicare come gli eventi temporaleschi si diversifichino notevolmente anche in zone molto vicine tra loro.

### 3.1.1 Il Contenuto idrico volumetrico

Il contenuto idrico volumetrico deriva dalla misura della costante dielettrica apparente rilevata dalle sonde 5TE della Dacagon, convertita in VWC attraverso l'equazione ottimizzata per i terreni salini descritta nel paragrafo 2.4.3 (eq. 2).

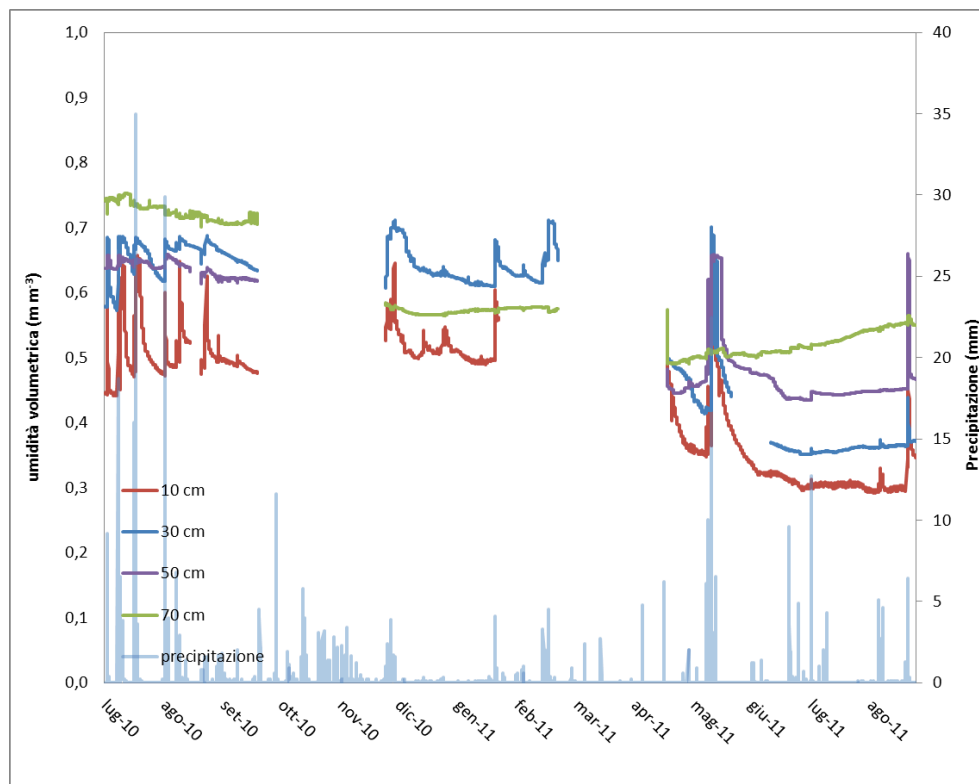


Figura 3.2 - VWC misurata della sonda 5TE durante i tre periodi nella stazione A in relazione ai mm giornalieri di pioggia

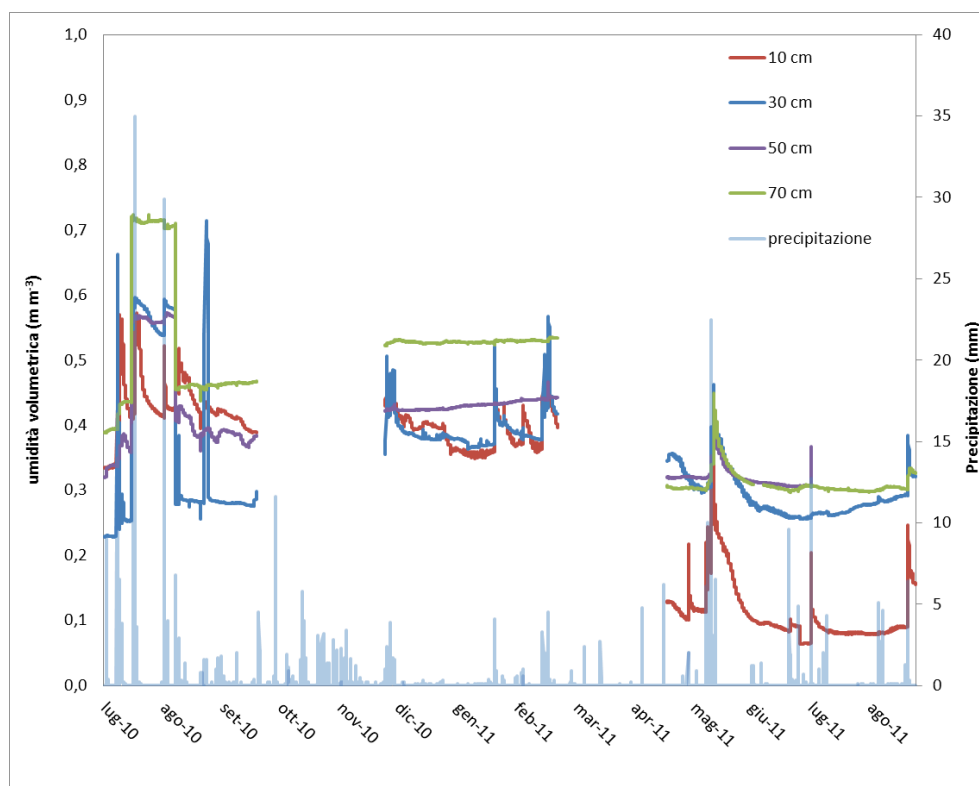


Figura 3.3 - VWC misurata della sonda 5TE durante i tre periodi nella stazione B in relazione ai mm giornalieri di pioggia

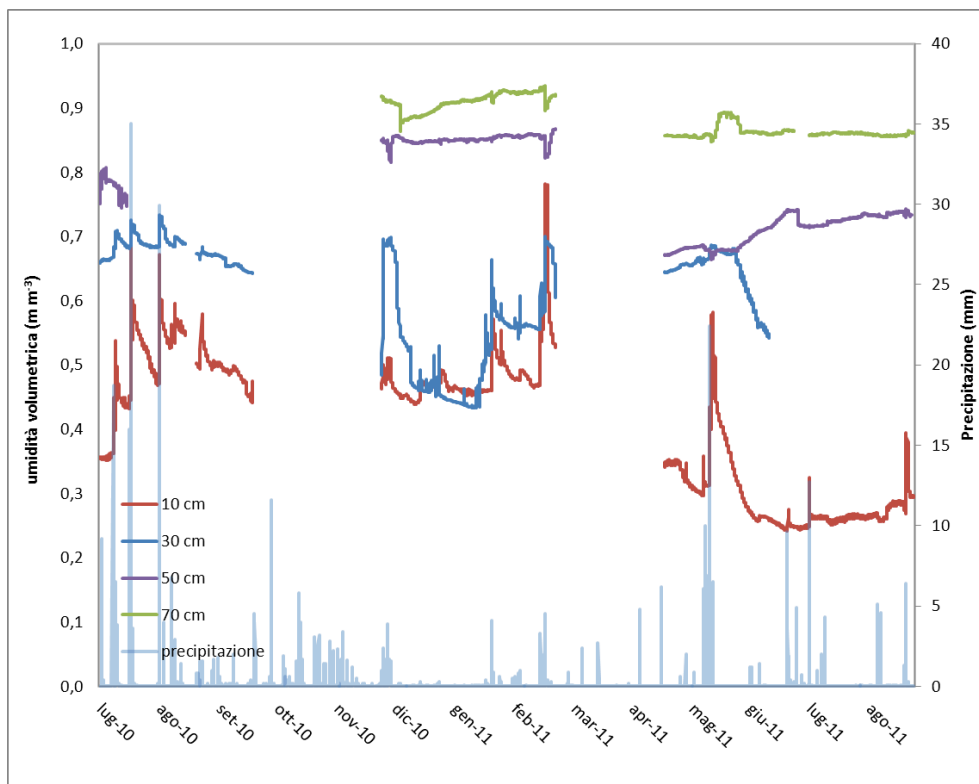


Figura 3.4 - VWC misurata della sonda 5TE durante i tre periodi nella stazione C in relazione ai mm giornalieri di pioggia

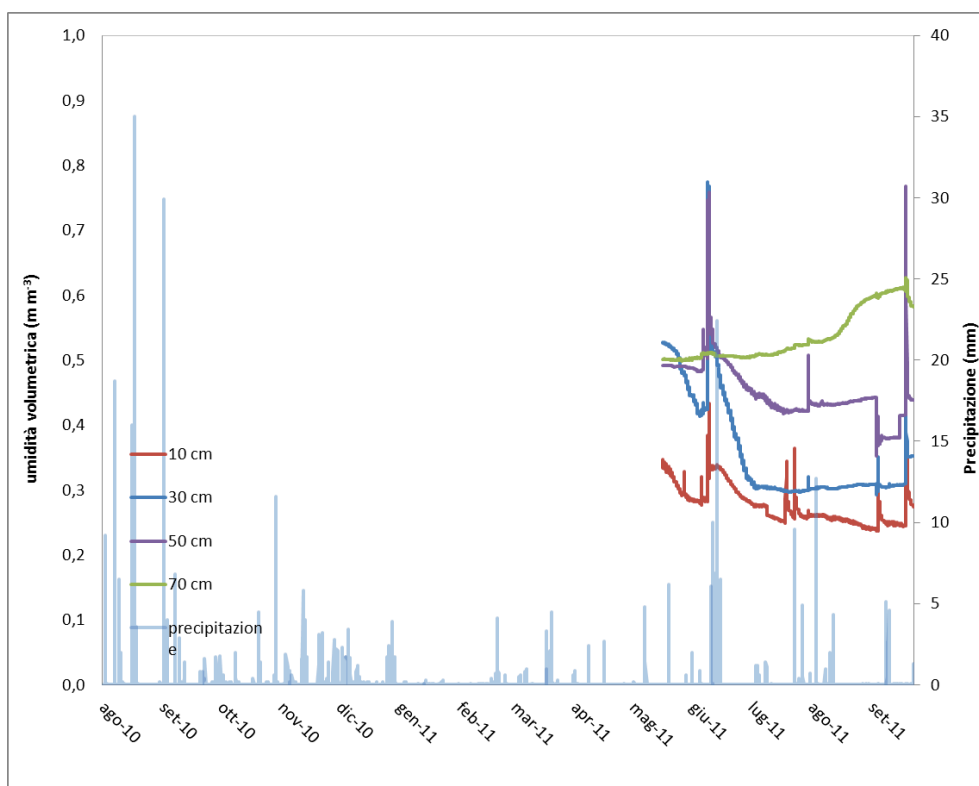


Figura 3.5 - VWC misurata della sonda 5TE durante il terzo periodo nella stazione D in relazione ai mm giornalieri di pioggia

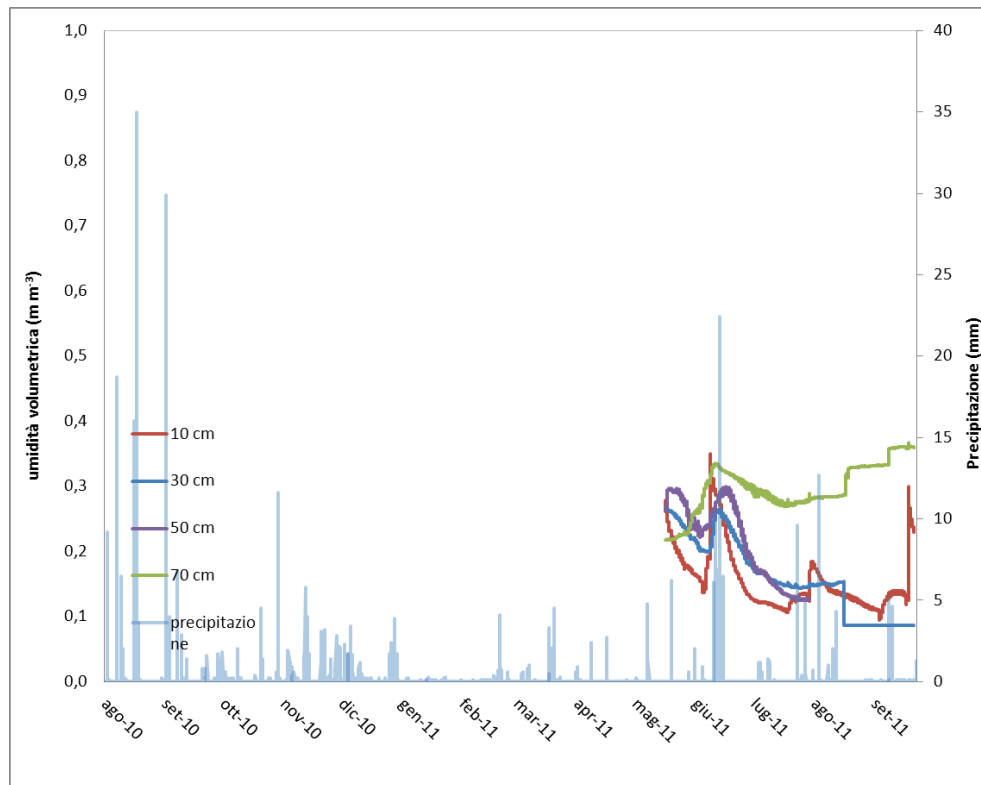


Figura 3.6 - VWC misurata della sonda 5TE durante il terzo periodo nella stazione E in relazione ai mm giornalieri di pioggia

Fin da una prima osservazione dei grafici appare evidente che il contenuto idrico volumetrico aumenta in maniera significativa in caso di precipitazioni rilevanti.

La sonda infatti registra dei veri e propri picchi in corrispondenza degli eventi piovosi, come si vede in tutti i periodi della stazione A (fig. 3.2).

Ovviamente tale risposta è maggiore negli strati superficiali del terreno, mentre risulta meno evidente a profondità superiori ai 50 cm, in rapporto anche alle caratteristiche del suolo e alla profondità di falda.

Una considerazione particolare va fatta per la stazione C, dove il contenuto a 50 e 70 cm di profondità appare prossime alla saturazione, in conseguenza al fatto che l'altezza media di falda si aggira attorno ai 50 cm, quindi molto prossima alla superficie.

### 3.1.2 La conducibilità elettrica apparente

Per quanto riguarda il rilievo della conducibilità elettrica apparente, anche in questo caso i grafici mettono in evidenza il confronto con la piovosità e le profondità indagate.

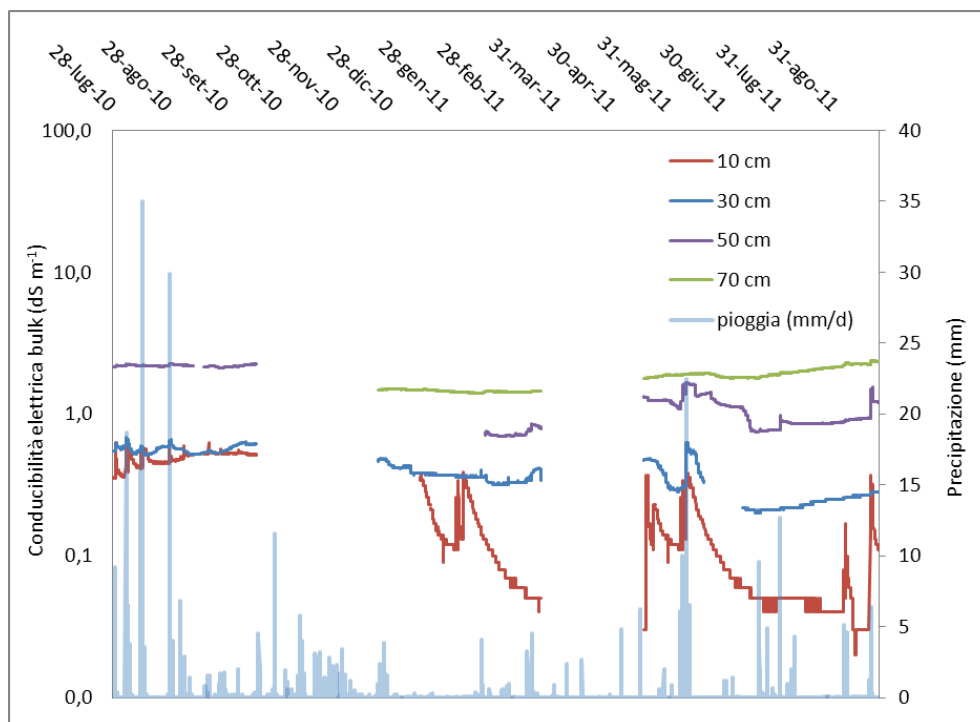


Figura 3.7 -  $EC_a$  misurata dalla sonda 5TE durante i tre periodi di campionamento nella stazione A in relazione alla piovosità (mm/d)

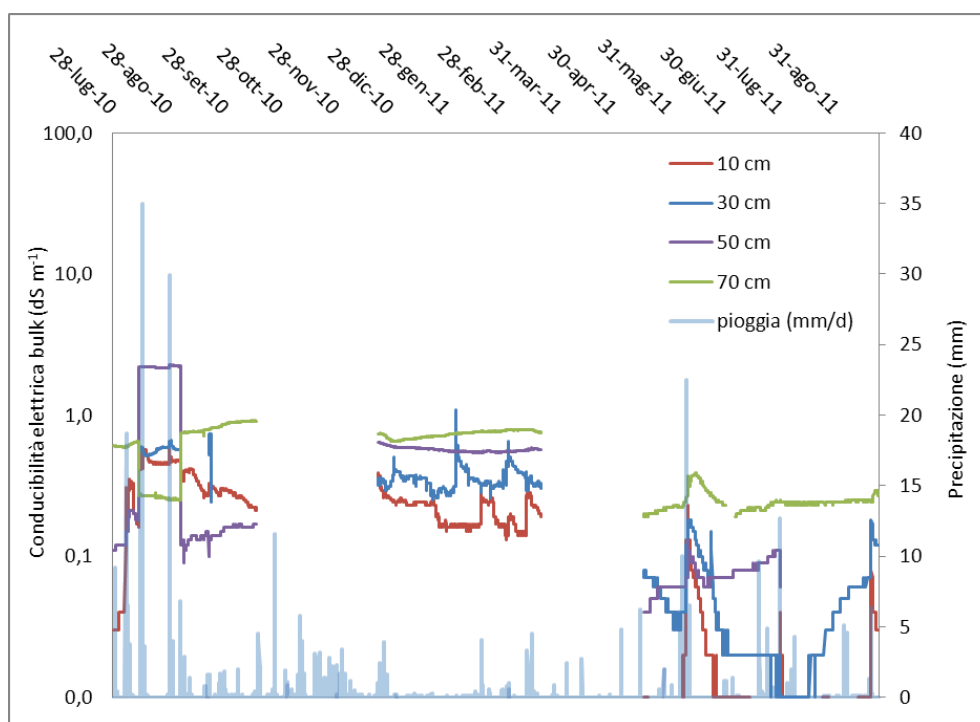


Figura 3.8 -  $EC_a$  misurata dalla sonda 5TE durante i tre periodi di campionamento nella stazione B in relazione alla piovosità (mm/d)

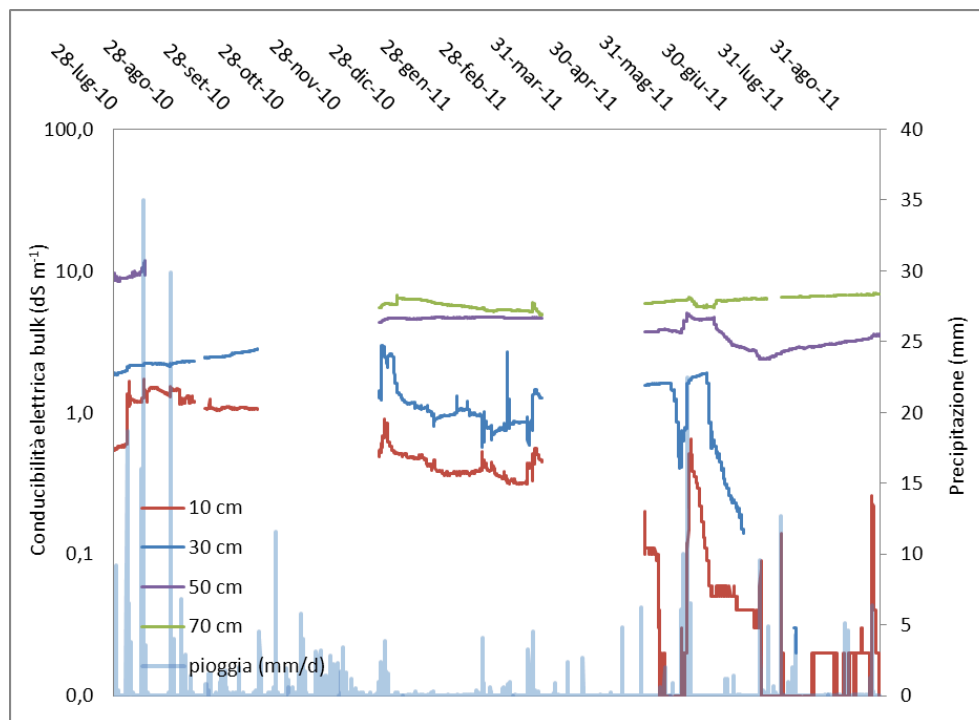


Figura 3.9 -  $EC_a$  misurata dalla sonda 5TE durante i tre periodi di campionamento nella stazione C in relazione alla piovosità (mm/d)

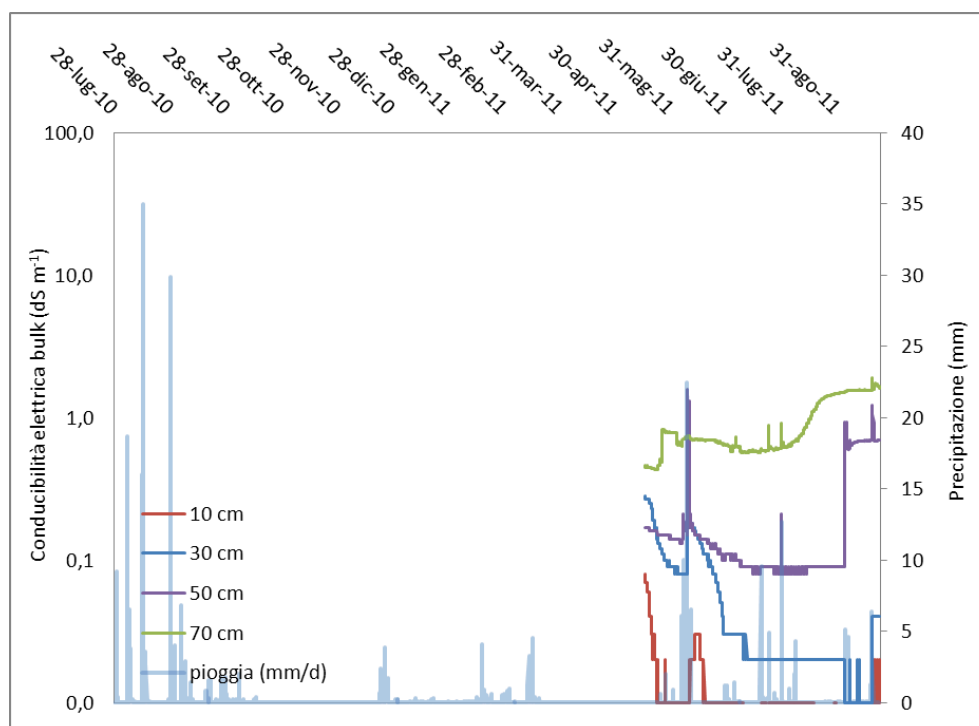


Figura 3.10 -  $EC_a$  misurata dalla sonda 5TE durante il terzo periodo di campionamento nella stazione D in relazione alla piovosità (mm/d)

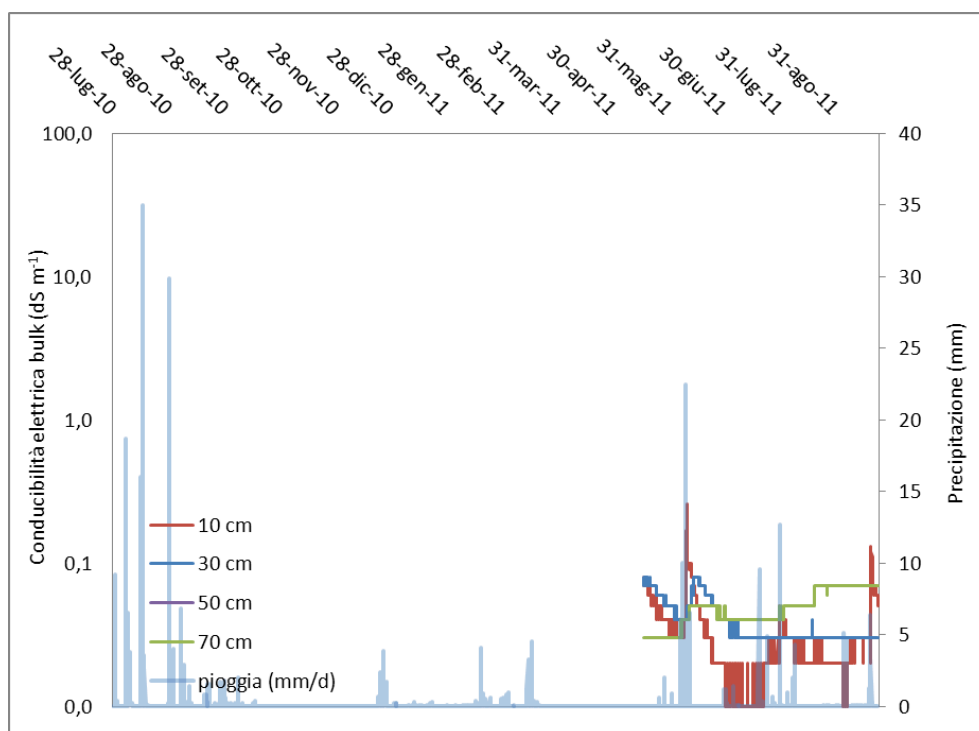


Figura 3.11 -  $EC_a$  misurata dalla sonda 5TE durante il terzo periodo di campionamento nella stazione D in relazione alla piovosità (mm/d)

Si può osservare come l' $EC_a$  risulti direttamente collegata alla salinità, al tipo di suolo e al contenuto idrico volumetrico. In risposta agli stessi eventi piovosi si riscontrano infatti valori medi piuttosto diversi tra loro, in relazione appunto alle caratteristiche e alla posizione della stazione presa in esame.

Facendo un confronto, quella in cui vengono riscontrati i valori di  $EC_a$  più alti risulta essere la C; conducibilità elettriche inferiori sono invece rilevate nelle stazioni B ed E.

Soffermandosi sulle caratteristiche delle singole aree, appare evidente come zone caratterizzate da un'alta umidità e salinità e bassi contenuti di sabbia (st. C), in cui prevalgono elementi colloidali e sostanza organica, trasmettano più facilmente il segnale elettrico, mostrando quindi i più alti valori di  $EC_a$ . Invece zone a prevalente contenuto sabbioso, che risultano influenzate da bassi valori di umidità, presentano pori di grandi dimensioni non adatti a trattenere l'acqua e quindi poco propensi alla conduzione del segnale elettrico.

Se si analizza l'andamento della conducibilità elettrica apparente con la piovosità, appare evidente come, nelle stazioni A, B, D ed E si verifichi un aumento dell' $EC_a$  in relazione all'umidità del terreno, questo a causa dei nuovi percorsi disponibili per la propagazione del segnale elettrico che vengono a crearsi con l'infiltrazione dell'acqua nel suolo. Nella



stazione C, in cui si osserva il maggiore contenuto di sali, l'andamento risulta invece opposto a quello appena spiegato: l'aumento dell'intensità delle precipitazioni porta in questo caso ad una diminuzione dell' $EC_a$ , in seguito alla diluizione del contenuto salino.

### 3.1.3 Temperatura media misurata dalle sonde 5TE

Un ulteriore dato rilevato dalla sonda 5TE riguarda la temperatura del suolo: il grafico riporta l'andamento medio della temperatura alle profondità di 10, 30, 50 e 70 cm relativamente alle cinque stazioni nei periodi in esame.

La temperatura media dell'aria invece fa riferimento ai dati provenienti dalla vicina stazione meteo di Sant'Anna (Chioggia).

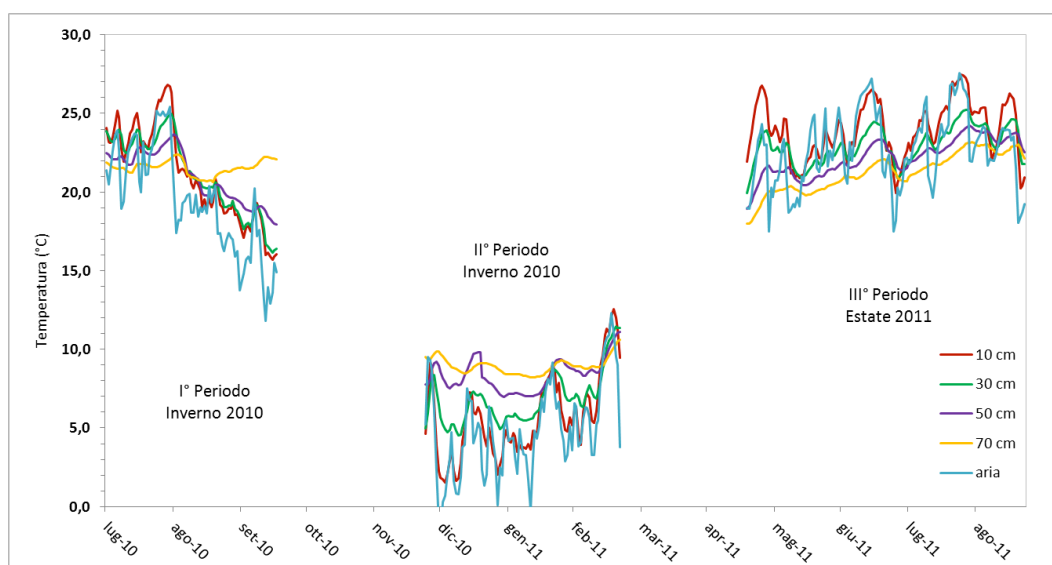


Figura 3.12 - Temperatura media del suolo relativa alle quattro profondità indagate

Come emerge dall'analisi del grafico in figura 3.12, si notano differenze piuttosto marcate tra i tre periodi nell'andamento della temperatura media alle diverse profondità; sono presenti infatti alti valori per i periodi estivi e bassi per quello invernale.

Mettendo in relazione la temperatura del suolo con l'andamento dell' $EC_a$ , si può notare come una diminuzione invernale porti ad un abbassamento della conducibilità elettrica apparente, sia a causa del più alto contenuto di umidità che dell'abbassamento della temperatura (Rhoades, 1999).

### **3.2 Analisi qualitativa delle acque**

Nelle seguenti tabelle vengono riassunti i risultati ottenuti dall'analisi delle soluzioni circolanti prelevate, divisi in base a stazione e profondità di campionamento: i dati sono stati espressi come valore minimo, massimo e medio, in modo da evidenziare la variabilità presente nell'area.

Tabella 3.1 - Valori minimi, massimi, medi e di mediana ottenuti dall'analisi delle soluzioni circolanti e dell'acqua di falda

Stazione	Profondità	pH				Ecw				Cloruri				Nitrati				Solfati			
		media	mediana	min	max	media	mediana	min	max	media	mediana	min	max	media	mediana	min	max	media	mediana	min	max
A	10	6.49	6.42	5.86	7.19	0.64	0.65	0.59	0.70	26.99	23.49	17.09	39.60	122.31	133.44	75.78	152.32	124.70	125.87	99.76	142.73
A	30	6.01	5.86	5.38	6.70	1.19	0.97	0.80	2.36	88.60	31.84	21.73	315.78	128.60	111.36	61.27	268.15	338.65	266.31	177.97	673.01
A	50	6.53	6.37	5.52	8.82	2.83	2.67	1.88	5.44	207.54	193.64	128.81	543.40	80.19	62.12	3.39	231.56	942.98	839.58	573.31	2601.97
A	70	7.55	7.45	6.54	8.48	5.13	6.16	1.61	7.51	454.75	450.11	97.08	952.29	145.82	122.40	2.63	335.84	1668.37	1840.33	412.61	2702.24
A	Falda	7.52	7.23	6.94	8.53	10.07	9.41	6.03	13.77	1681.17	1459.94	603.30	3493.90	4.17	4.38	0.38	8.40	1307.51	1295.36	496.59	2217.65
B	10	8.43	8.56	7.82	8.79	1.01	0.84	0.54	1.82	72.07	25.87	8.43	228.13	118.59	60.37	10.85	342.77	125.75	103.72	44.71	250.86
B	30	8.41	8.35	8.02	8.84	0.93	0.94	0.54	1.35	16.20	11.87	5.94	30.47	128.02	150.48	26.41	227.46	122.91	125.87	71.16	218.71
B	50	8.37	8.40	7.94	8.90	1.76	1.64	0.92	3.03	16.70	16.54	8.05	33.12	152.02	145.73	73.04	260.36	487.44	274.47	67.27	2367.72
B	70	8.10	8.08	7.41	8.59	2.46	2.62	0.94	3.02	69.67	24.13	11.94	782.08	161.17	149.07	78.97	267.86	988.58	1020.95	171.99	1598.00
B	Falda	7.78	7.60	6.91	8.76	6.01	6.18	3.38	7.74	838.54	808.20	136.28	1286.54	10.78	1.73	0.67	38.63	993.41	1054.72	364.54	1466.28
C	10	8.52	8.54	8.15	8.83	2.08	1.92	1.58	3.01	308.21	226.40	132.68	584.02	72.86	76.52	19.64	105.20	376.34	297.16	195.50	711.33
C	30	8.24	8.25	7.91	8.40	4.76	4.75	3.50	5.54	816.55	726.73	395.44	1281.11	35.01	36.15	14.13	47.44	752.53	756.21	610.88	848.53
C	50	7.58	7.85	6.42	8.84	11.05	10.44	6.79	16.01	2086.76	2003.91	840.51	3621.20	na	na	na	na	862.84	868.04	382.30	1319.66
C	70	7.62	7.54	6.58	8.77	15.86	16.69	9.62	20.40	3313.70	3130.03	1415.13	5013.67	37.89	2.61	0.81	104.09	803.54	786.30	103.10	1291.99
C	Falda	8.15	8.21	7.21	9.12	11.92	12.44	3.76	17.46	2639.85	2689.26	467.46	3888.13	16.80	7.63	0.18	48.71	562.87	474.95	273.82	1384.01
D	10																				
D	30	7.57	7.57	7.29	7.84	1.61	1.61	1.54	1.69	30.25	30.25	18.99	41.50	140.79	140.79	7.05	274.52	646.99	646.99	428.37	865.61
D	50	7.61	7.60	6.91	8.40	5.05	3.41	3.14	8.60	597.02	54.95	29.53	1856.50	2.08	1.67	0.66	3.92	1573.86	1630.27	762.37	2147.23
D	70	7.44	7.54	6.92	8.10	5.24	3.01	2.78	10.65	635.93	104.30	42.63	1687.60	1.34	1.34	0.31	2.38	1055.14	1606.64	163.10	1908.20
D	Falda	7.41	7.43	6.86	8.04	3.13	3.17	2.68	3.40	72.41	64.62	30.39	108.07	9.84	9.84	2.22	17.46	1408.49	1528.20	722.67	1951.15
E	10																				
E	30																				
E	50																				
E	70	7.93	8.01	7.33	8.48	1.31	1.12	0.95	2.80	68.17	41.14	28.89	246.38	173.57	184.36	87.90	224.20	183.80	72.22	49.13	897.88
E	Falda	7.40	7.44	7.16	7.74	2.12	2.16	1.69	2.59	176.36	178.45	109.28	249.04	16.48	16.48	2.88	30.09	493.85	540.91	260.11	650.33

Stazione	Profondità	Sodio				Ammonio				Potassio				Magnesio				Calcio			
		media	mediana	min	max	media	mediana	min	max	media	mediana	min	max	media	mediana	min	max	media	mediana	min	max
A	10.00	155.51	53.40	22.06	595.59	0.87	0.87	0.87	0.87	15.66	14.27	7.86	26.22	64.86	35.13	6.94	217.63	129.36	65.57	11.60	359.82
A	30.00	69.68	44.58	36.33	174.00	2.37	2.37	2.37	2.37	12.21	5.21	1.53	33.46	36.92	22.98	14.29	91.44	91.74	61.06	30.99	223.94
A	50.00	249.29	196.35	39.30	891.50	2.27	2.48	1.32	2.82	15.54	13.93	1.64	54.30	137.14	94.43	21.90	366.64	209.06	192.66	58.08	527.83
A	70.00	379.32	342.02	77.08	800.58	5.42	2.49	1.38	17.92	21.44	23.31	6.08	33.12	210.23	160.86	44.85	497.99	320.43	294.70	86.04	641.47
A	Falda	1089.21	1046.11	623.64	1829.31	15.83	13.73	8.58	25.78	46.98	41.86	16.17	96.00	316.25	304.38	162.72	527.31	382.18	378.28	215.31	639.71
B	10.00	118.38	24.03	9.61	415.87	6.41	6.41	1.00	11.81	14.27	18.60	5.62	18.61	88.80	47.49	7.50	252.73	183.13	159.99	64.57	347.98
B	30.00	279.76	25.78	10.94	885.97	7.76	3.12	2.05	18.11	20.79	20.21	3.76	40.24	70.93	46.52	16.21	167.53	207.23	147.32	81.29	477.22
B	50.00	49.21	24.51	12.61	160.44	3.16	3.13	0.95	6.96	10.89	10.87	5.96	17.73	76.70	70.07	23.54	150.20	316.26	219.05	89.24	873.15
B	70.00	78.76	26.56	11.12	828.08	4.69	2.69	1.13	18.81	7.85	6.91	0.36	37.24	76.34	76.93	25.00	119.88	401.09	372.75	95.14	812.86
B	Falda	707.01	677.63	166.81	1714.67	7.75	6.95	0.48	22.27	28.79	24.76	8.98	51.16	143.49	134.61	67.07	334.07	281.72	235.53	85.52	740.66
C	10.00	423.91	295.60	146.25	1016.87	5.52	3.40	0.73	12.44	15.04	8.56	8.22	34.84	70.38	45.15	7.19	205.23	132.29	127.42	32.20	266.28
C	30.00	403.18	506.63	25.04	593.37	6.27	6.27	4.83	7.71	10.82	12.01	1.27	16.46	69.96	67.24	22.69	101.60	300.71	323.41	74.01	412.92
C	50.00	1195.12	1210.34	449.92	1865.77	12.26	10.72	3.22	22.66	36.36	39.76	7.77	63.74	164.58	186.96	56.54	264.90	324.13	333.25	173.79	516.38
C	70.00	2058.95	1941.96	829.40	3092.94	18.68	18.75	3.69	29.31	63.93	68.06	21.81	116.54	252.81	246.85	53.89	464.18	254.90	254.51	113.97	432.29
C	Falda	1694.82	1526.49	497.85	2951.82	13.19	13.15	0.15	26.01	60.86	63.96	2.86	102.60	169.44	168.79	50.69	322.49	170.56	139.16	73.77	488.96
D	10.00																				
D	30.00	58.61	58.61	50.65	66.57	1.02	1.02	0.99	1.06	11.95	11.95	10.25	13.65	78.84	78.84	71.73	85.95	199.13	199.13	171.72	226.55
D	50.00	228.02	109.28	64.83	684.66	4.49	2.91	0.94	13.49	11.27	10.64	8.39	15.01	228.22	226.78	129.96	318.93	554.63	528.90	451.42	743.67
D	70.00	414.59	95.28	70.36	1517.75	6.06	5.37	1.27	16.38	11.47	10.55	9.31	18.62	145.11	174.27	45.91	199.27	366.12	430.99	136.65	546.97
D	Falda	99.47	55.38	40.56	194.36	6.34	4.31	2.31	16.42	13.18	12.50	10.34	17.62	161.92	179.10	97.17	199.23	460.45	491.31	273.26	597.76
E	10.00																				
E	30.00																				
E	50.00																				
E	70.00	96.40	107.33	20.42	179.49	2.91	2.68	0.39	6.75	12.81	11.73	5.97	22.17	53.01	43.30	32.97	120.87	178.52	177.34	120.83	301.64
E	Falda	229.83	189.81	128.89	374.99	6.10	4.45	1.04	14.62	10.03	9.72	8.35	14.98	55.19	54.28	46.25	70.62	212.15	201.47	178.91	264.78

Da un rapido esame dei risultati, si evidenzia un'ampia variabilità per tutti i valori analizzati, sia confrontando le stazioni che in rapporto alla profondità considerata. Tra le diverse aree si possono infatti notare variazioni di  $EC_w$  che vanno da un minimo di  $0.64 \text{ dS m}^{-1}$  per la stazione A (profondità 10 cm) ad un massimo di  $15.86 \text{ dS m}^{-1}$  per la stazione C (falda).

Considerando invece gli ioni maggiormente responsabili del processo di salinizzazione, si può vedere come, sia per i cloruri che per il sodio, si riscontrino valori minimi in B e massimi in C.

Per un'analisi più approfondita di tutti gli elementi si rimanda ai paragrafi che seguono.

Tutti i parametri del suolo e delle acque analizzati sono stati messi a confronto mediante una matrice di correlazione ( $p < 0.01$ ), per verificare se vi sia o meno una tendenza delle variabili a cambiare in modo associato tra loro (tab. 3.2).

**Tabella 3.2** - Coefficienti di correlazione per i diversi parametri analizzati: i valori in rosso indicano una correlazione significativa.

Parametro	h Falda	pH	ECw	hPa	VWC	ECa	Cloruri	Nitrati	Solfati	Sodio	Potassio	Magnesio	Calcio
h Falda	1.000	-0.532	0.449	-0.065	0.807	0.494	0.320	-0.519	0.337	0.365	0.185	0.334	-0.082
pH	-0.532	1.000	0.014	-0.158	-0.528	-0.108	0.057	0.089	-0.060	-0.030	0.049	-0.066	0.178
ECw	0.449	0.014	1.000	-0.086	0.568	0.924	0.741	-0.329	0.365	0.693	0.520	0.581	0.193
hPa	-0.065	-0.158	-0.086	1.000	-0.068	-0.100	-0.054	0.055	-0.047	-0.067	-0.080	-0.035	-0.065
topp	0.699	-0.325	0.727	-0.183	0.934	0.827	0.471	-0.342	0.239	0.559	0.401	0.406	-0.007
VWC	0.807	-0.528	0.568	-0.068	1.000	0.669	0.405	-0.391	0.268	0.471	0.318	0.359	-0.086
ECa	0.494	-0.108	0.924	-0.100	0.669	1.000	0.660	-0.342	0.203	0.728	0.545	0.520	0.034
Cloruri	0.320	0.057	0.741	-0.054	0.405	0.660	1.000	-0.297	0.230	0.837	0.715	0.597	0.049
Nitrati	-0.519	0.089	-0.329	0.055	-0.391	-0.342	-0.297	1.000	-0.431	-0.366	-0.110	-0.448	-0.146
Solfati	0.337	-0.060	0.365	-0.047	0.268	0.203	0.230	-0.431	1.000	0.158	-0.005	0.640	0.597
Sodio	0.365	-0.030	0.693	-0.067	0.471	0.728	0.837	-0.366	0.158	1.000	0.837	0.726	0.047
Potassio	0.185	0.049	0.520	-0.080	0.318	0.545	0.715	-0.110	-0.005	0.837	1.000	0.555	-0.003
Magnesio	0.334	-0.066	0.581	-0.035	0.359	0.520	0.597	-0.448	0.640	0.726	0.555	1.000	0.446
Calcio	-0.082	0.178	0.193	-0.065	-0.086	0.034	0.049	-0.146	0.597	0.047	-0.003	0.446	1.000

In particolare, viene evidenziato come l' $EC_w$  sia altamente correlata con l' $EC_a$  ( $r = 0.92$ ), con i cloruri e con il sodio (rispettivamente  $r = 0.74$ ;  $r = 0.69$ ).

Lo stretto legame fra  $EC_w$  e cloruro di sodio indica quindi una conseguenza diretta dell'intrusione di acqua salata dalla laguna.

A causa della notevole differenza tra i suoli delle diverse stazioni e del livello della falda, che varia di quasi un metro tra le varie zone, la correlazione tra l'altezza di falda e l' $EC_w$  non risulta molto alta, ma comunque significativa ( $r = 0.45$ ). Si può inoltre notare come il contenuto indrico volumetrico (VWC) sia correlato positivamente con quasi tutti gli ioni. Tale comportamento può derivare dal fatto che, per risalita capillare, gli ioni vengono

traportati dalla falda verso la superficie, per poi precipitare lungo il profilo del suolo, da dove vengono poi ridisciolti all'aumentare del contenuto idrico.

Un'analisi più dettagliata delle relazioni esistenti tra i parametri più significativi è riportata nelle figure 3.13, 3.14 e 3.15. Si evince come l' $EC_w$  sia ben correlata con il sodio e con i cloruri, e come sodio e cloruri siano a loro volta fortemente correlati tra di loro. Diventa pertanto evidente come la conducibilità elettrica sia influenzata in modo diretto da questi due ioni, associati al cloruro di sodio contenuto nelle acque marine.

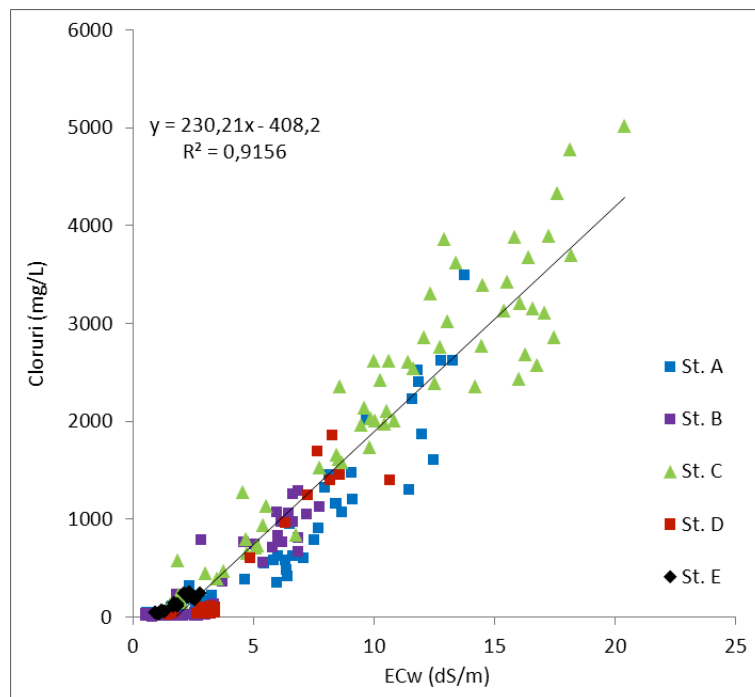


Figura 3.13 - Grafico di correlazione tra l' $EC_w$  e la quantità di cloruri presenti nella soluzione circolante; sono stati considerati i dati relativi a tutte le stazioni e a tutte le profondità

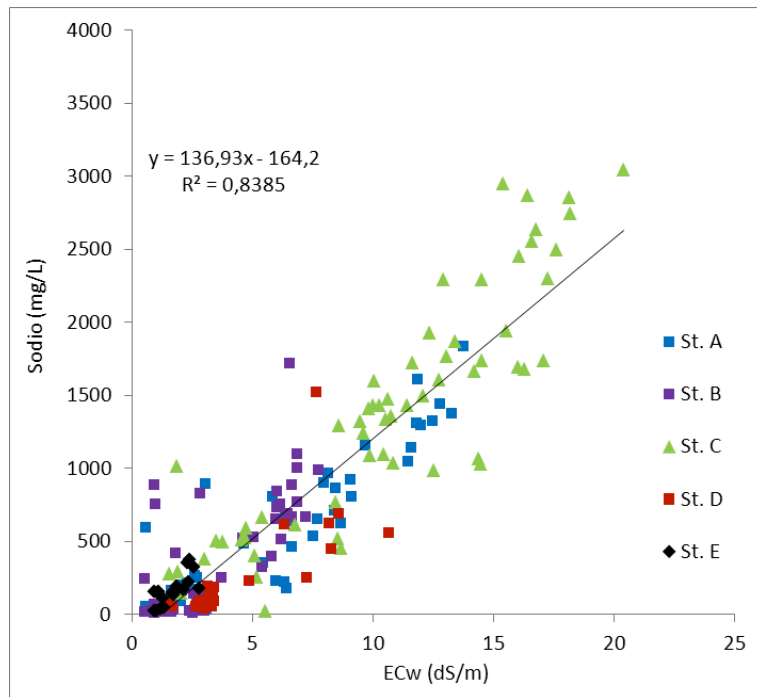


Figura 3.14 - Grafico di correlazione tra l'EC<sub>w</sub> e la quantità di sodio presente nella soluzione circolante; sono stati considerati i dati relativi a tutte le stazioni e a tutte le profondità

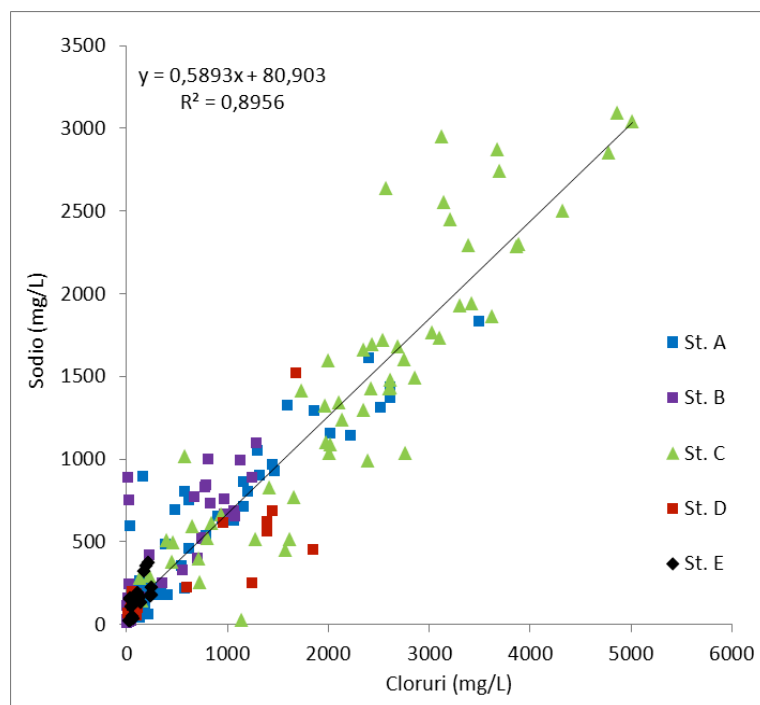


Figura 3.15 - Grafico di correlazione tra la quantità di sodio e i cloruri presenti nella soluzione circolante; sono stati considerati i dati relativi a tutte le stazioni e a tutte le profondità

### 3.2.1 Andamento dell' $EC_w$ nel corso dei tre periodi nelle cinque stazioni

In questo paragrafo viene presentato l'andamento della conducibilità elettrica dell'acqua ( $EC_w$ ) nelle cinque stazioni durante i tre periodi di campionamento.

I dati sono stati divisi in base alla stazione di appartenenza e alla profondità; per alcune date però, specialmente nelle stazioni sabbiose, i microlisimetri non sono riusciti ad estrarre l'acqua circolante a causa del basso potenziale matriciale del suolo, e non risultano quindi disponibili campioni. Per quanto riguarda le stazioni D ed E, essendo state installate solo a partire dal 17 maggio 2011, viene considerato solo l'ultimo periodo.

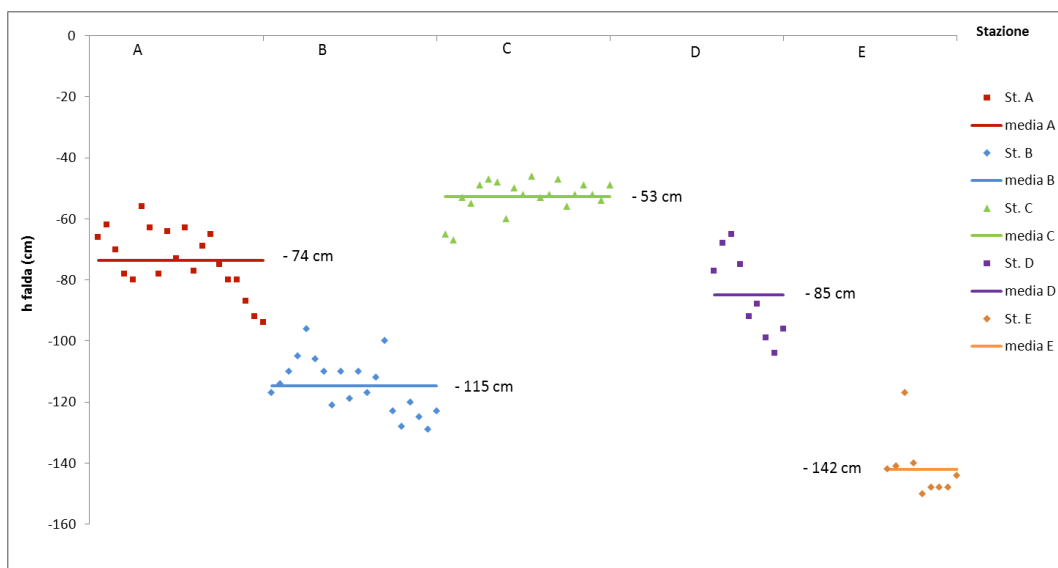


Figura 3.16 - Altezza di falda nelle cinque stazioni monitorate: i dati delle stazioni D ed E comprendono solo il terzo periodo di indagine

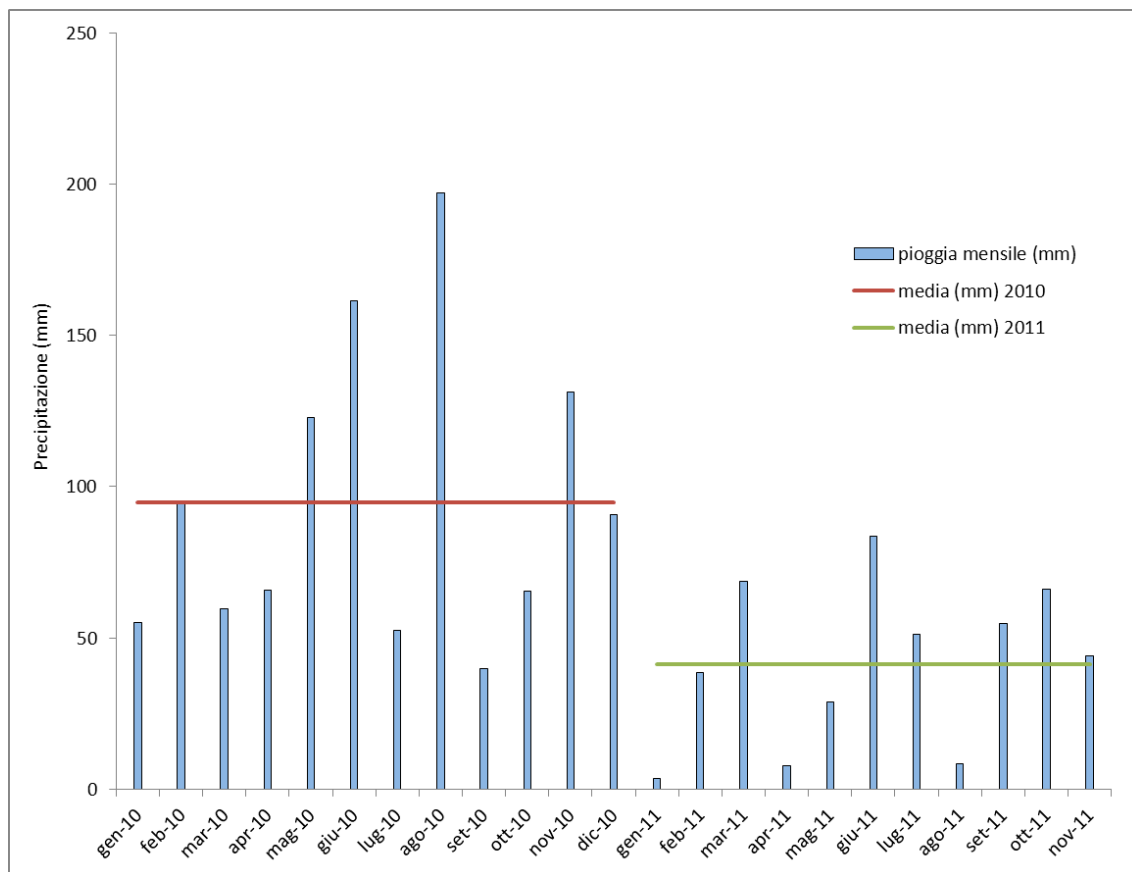


Figura 3.17 - Confronto tra la piovosità media (S. Anna e Zennare) tra il 2010 e il 2011 (mm mese)

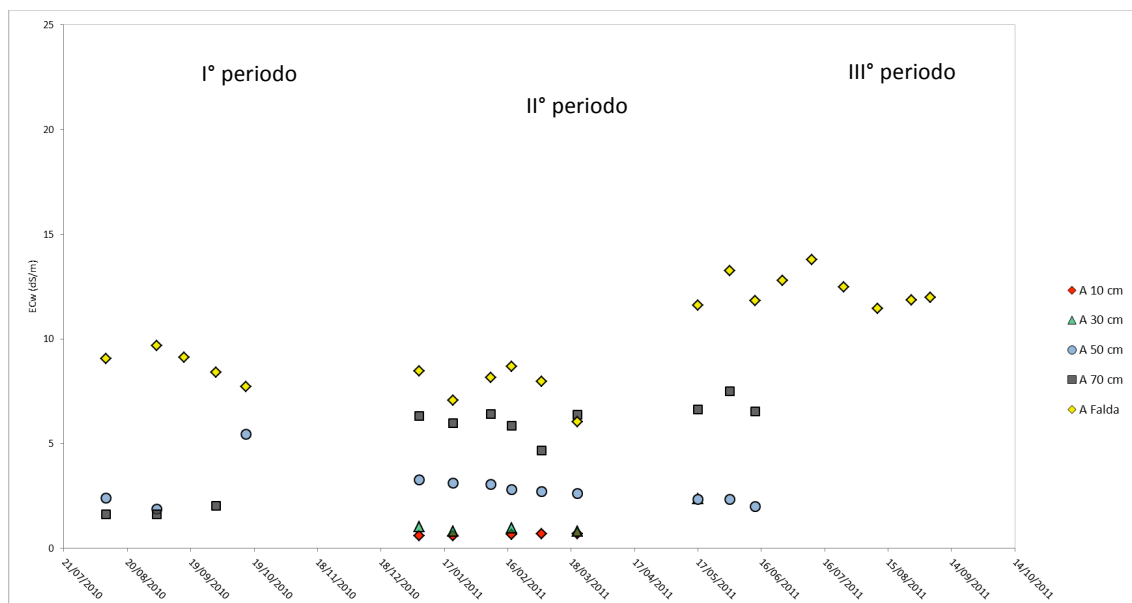


Figura 3.18 - Andamento dell'EC<sub>w</sub> nell'acqua di falda con la profondità per la stazione A



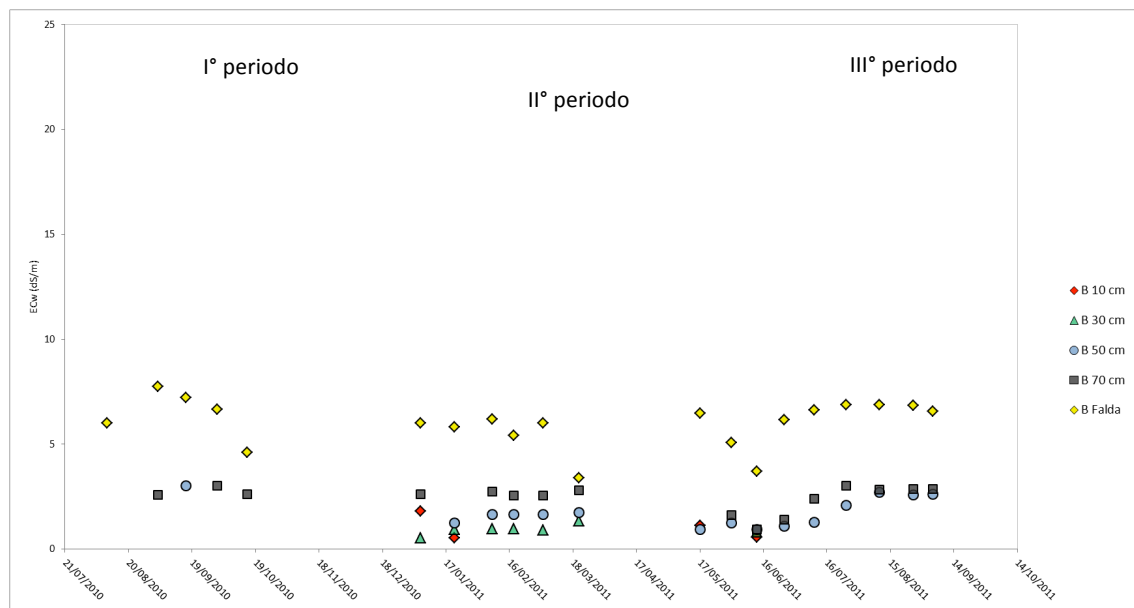


Figura 3.19 - Andamento dell' $EC_w$  nell'acqua di falda con la profondità per la stazione B

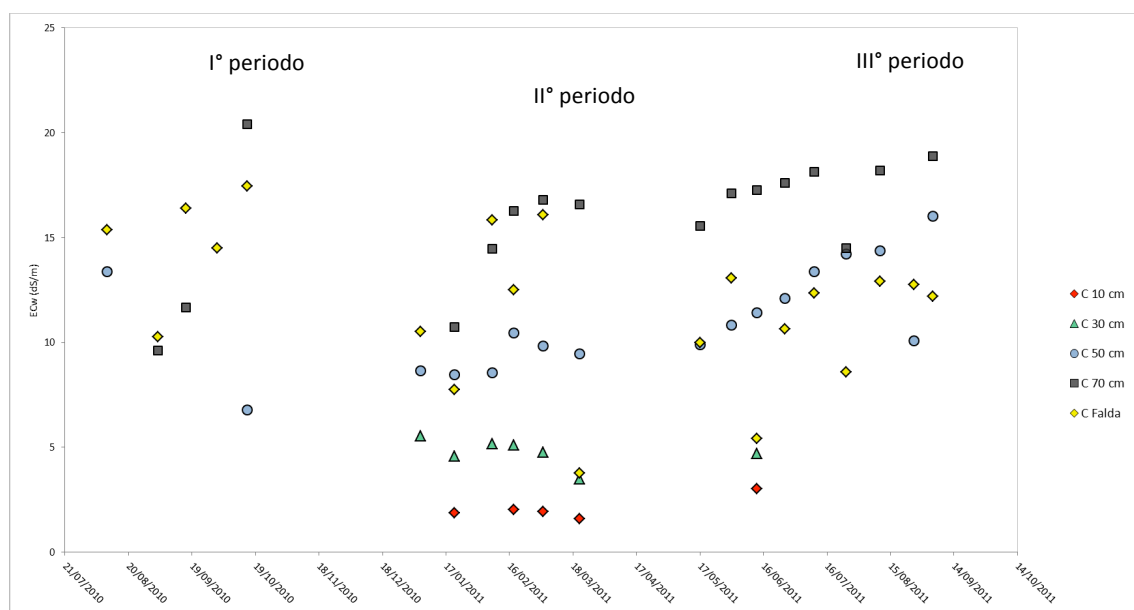


Figura 3.20 - Andamento dell' $EC_w$  nell'acqua di falda con la profondità per la stazione C

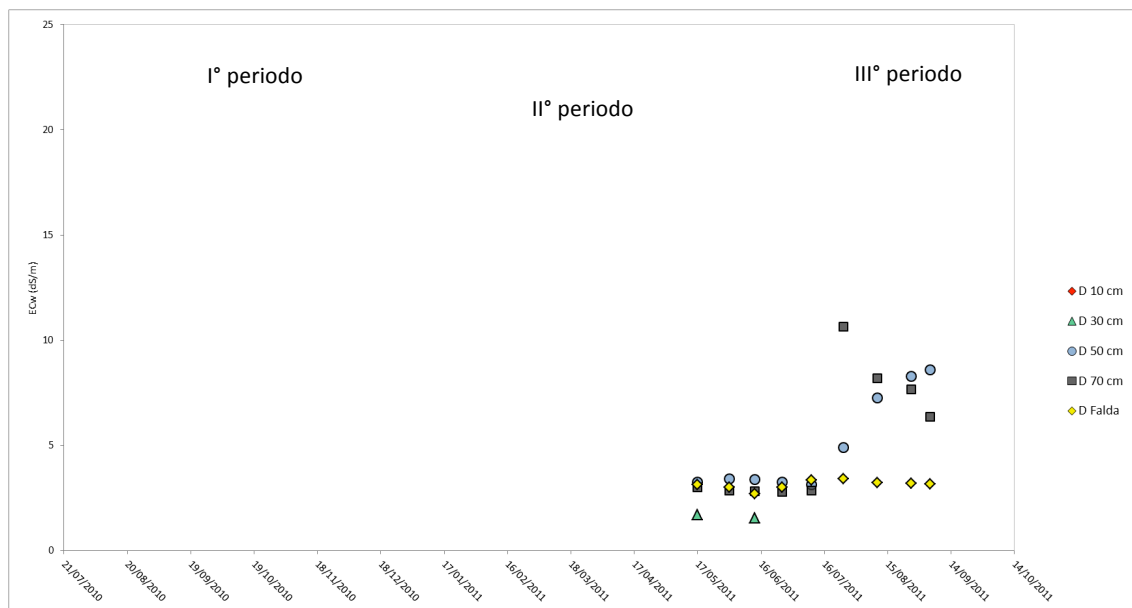


Figura 3.21 - Andamento dell'EC<sub>w</sub> nell'acqua di falda con la profondità per la stazione D

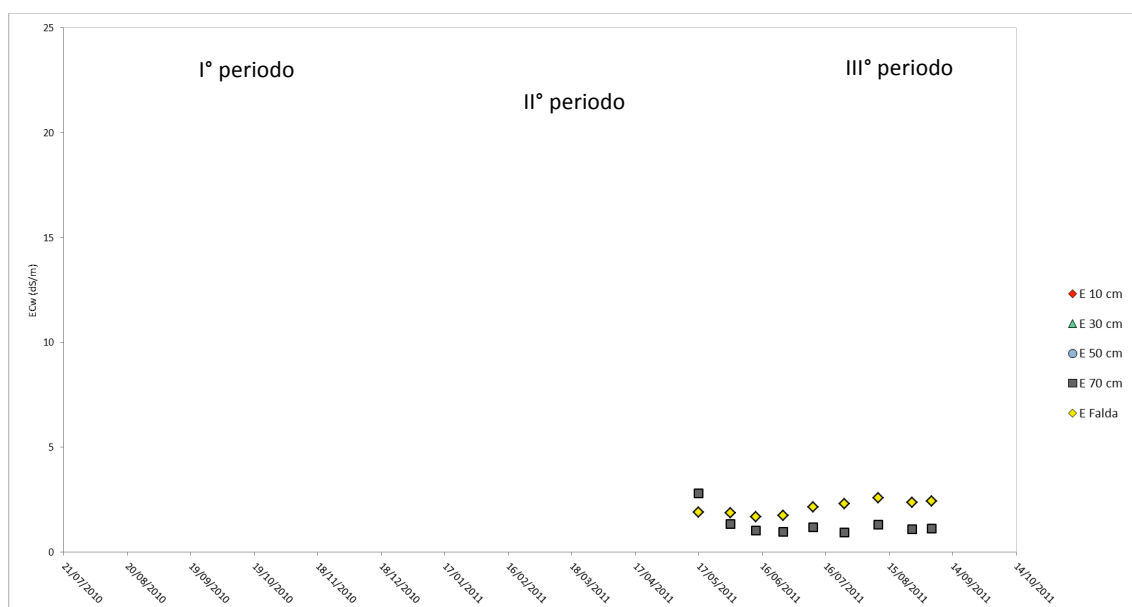


Figura 3.22 - Andamento dell'EC<sub>w</sub> nell'acqua di falda con la profondità per la stazione E

Un confronto fra l'andamento dell'EC<sub>w</sub> e quello dell'altezza di falda conferma la relazione positiva fra questi due parametri. I loro andamenti infatti presentano diverse analogie, soprattutto prendendo in esame la profondità di 70 cm (profilo più prossimo alla tavola d'acqua) e l'acqua prelevata direttamente dal piezometro.

Nella maggior parte dei casi, ad alti livelli di falda corrispondono anche alti livelli di conducibilità elettrica, e, quando la falda si abbassa, diminuisce anche l'EC<sub>w</sub>, indice del

fatto che l'acqua presente sotto la maggior parte delle stazioni deriva dall'intrusione dell'acqua lagunare. Questo fenomeno diventa meno evidente verso la superficie: l'acqua che sale dalla falda per risalita capillare non interessa infatti tutto il profilo verticale del suolo, ma ha effetto soprattutto negli strati più profondi. In particolare, nelle stazioni B ed E, collocate all'interno dei due paleoalvei, in cui la profondità media di falda è di 115 cm (stazione B) e 142 cm (stazione E), il fenomeno di risalita capillare risulta molto meno significativo a causa del tipo di terreno, composto prevalentemente da sabbia e caratterizzato quindi da pori di grandi dimensioni, che facilitano il dilavamento in occasione degli eventi piovosi e rallentano il movimento in condizioni insature.

Il grafico della stazione A è ben rappresentativo del fatto che l'andamento della conducibilità elettrica nella falda risulta inferiore durante i primi due periodi (estate e inverno 2010) rispetto al terzo (estate 2011), quando è stata rilevata una scarsa piovosità. Infatti, di fronte a precipitazioni costanti e di una certa entità in tutto l'arco del 2010, il livello di  $EC_w$  è risultato inferiore a quello del 2011, a causa probabilmente del processo di lisciviazione dei sali presenti nel terreno.

Nelle stazioni B e C un andamento di questo tipo appare decisamente meno evidente, forse a causa della profondità di falda: molto elevata per la stazione B, più vicina alla superficie per la C, dove l'altezza del campionamento supera quella di falda.

Nelle cinque stazioni inoltre, si può osservare che i livelli più alti di conducibilità sono presenti nella stazione C ( $p < 0.01$ ), sia a causa della sua posizione geografica, molto vicina al margine lagunare, sia per il fatto che l'altezza media di falda risulta essere la più bassa tra tutte quelle analizzate (-53 cm), andando quindi ad influenzare quasi tutto il profilo verticale analizzato. La conducibilità diminuisce poi progressivamente nelle stazioni A, B, D ed E, queste ultime caratterizzate da valori molto più bassi, fino a 10-15 dS/m, rispetto alla stazione C.

Da una più dettagliata analisi del grafico relativo alla stazione C, si nota come i valori di conducibilità elettrica della soluzione circolante, prelevata a 70 cm, risultino in alcuni casi più alti di quelli della falda.

Anche nella stazione D, durante l'ultimo periodo, si osservano valori di  $EC_w$  più alti per i campioni prelevati alle profondità di 70 cm rispetto a quelli rilevati direttamente nell'acqua di falda. Questo comportamento potrebbe essere messo in relazione con un accumulo di sali nel profilo e/o con un aumento delle concentrazioni, determinato dal

minore contenuto idrico della zona insatura (per la stazione D) o dal fenomeno di stratificazione nella falda, per cui l'acqua risulta essere meno salata in superficie.

La distribuzione della salinità lungo il profilo è osservabile nelle stazioni A, B e C il 18 febbraio 2011 e 21 marzo 11; in tali date è stato possibile raccogliere la soluzione circolante da tutti i lisimetri .

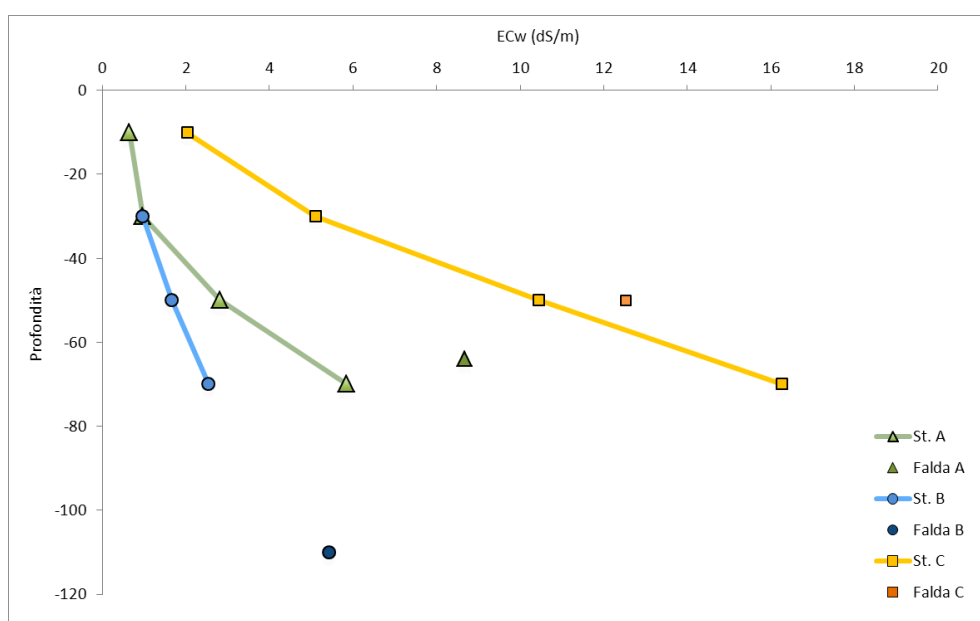


Figura 3.23 - Andamento dell'EC<sub>w</sub> con la profondità nelle stazioni A B C in data 18/2/11

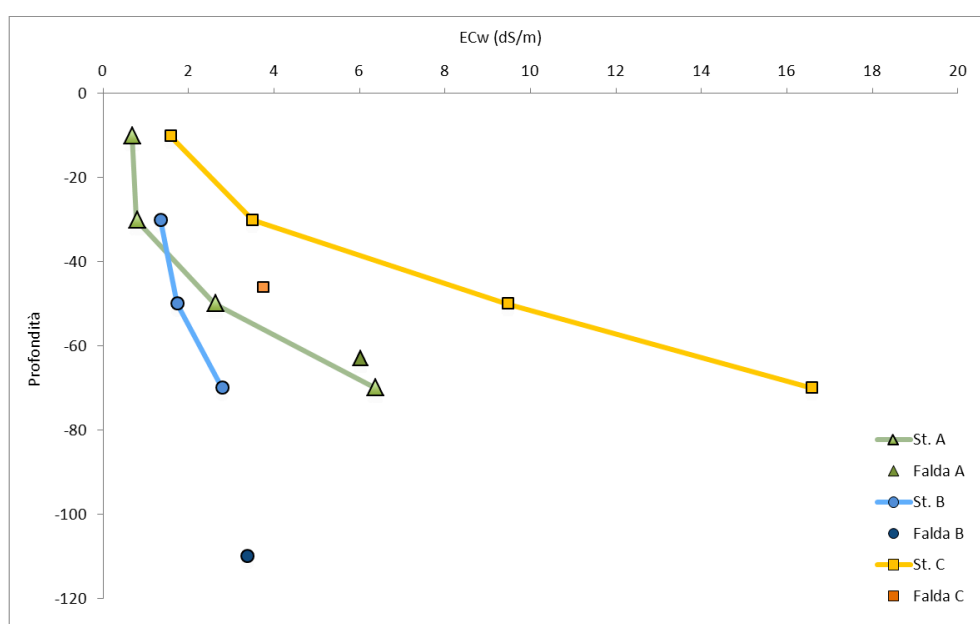


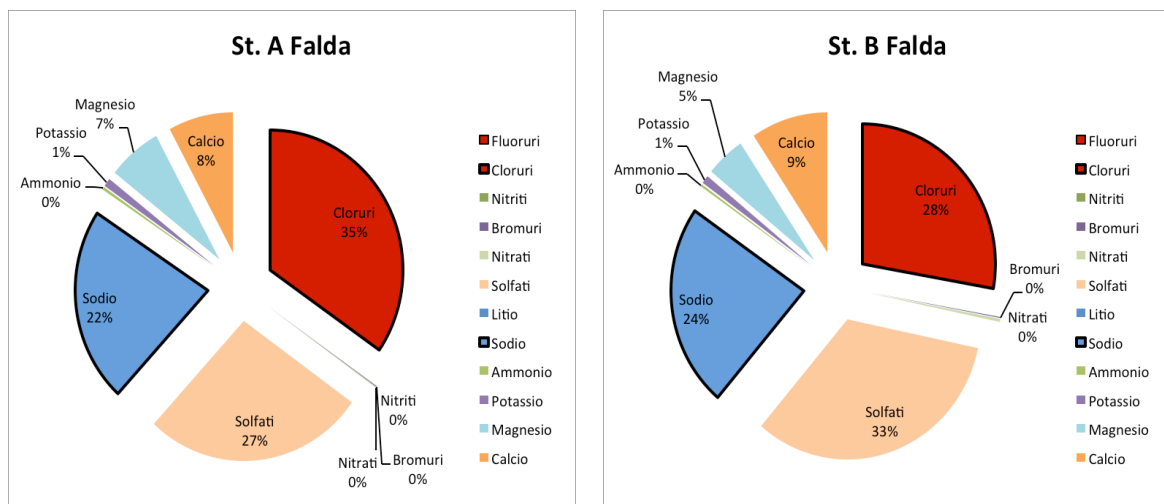
Figura 3.24 - Andamento dell'EC<sub>w</sub> con la profondità nelle stazioni A B C in data 21/3/11

Dalle figure 3.23 e 3.24 si può vedere come la salinità dell'acqua dei pori aumenti con la profondità, in funzione delle diverse caratteristiche chimico-fisiche e idrauliche delle stazioni e della sorgente dell'inquinamento salino.

Nelle tre stazioni, infatti, l' $EC_w$  risulta piuttosto simile nei primi strati di terreno, per andare poi a differenziarsi con il crescere della profondità.

### 3.2.2 Le analisi delle acque di falda nelle singole stazioni

I grafici riportati in questo paragrafo rappresentano la percentuale media degli ioni rilevati nell'acqua di falda delle cinque stazioni, ad indicare come le diverse aree indagate siano soggette a contaminazione salina di differente entità, andando quindi ad influire in modo diverso sui terreni a diretto contatto.



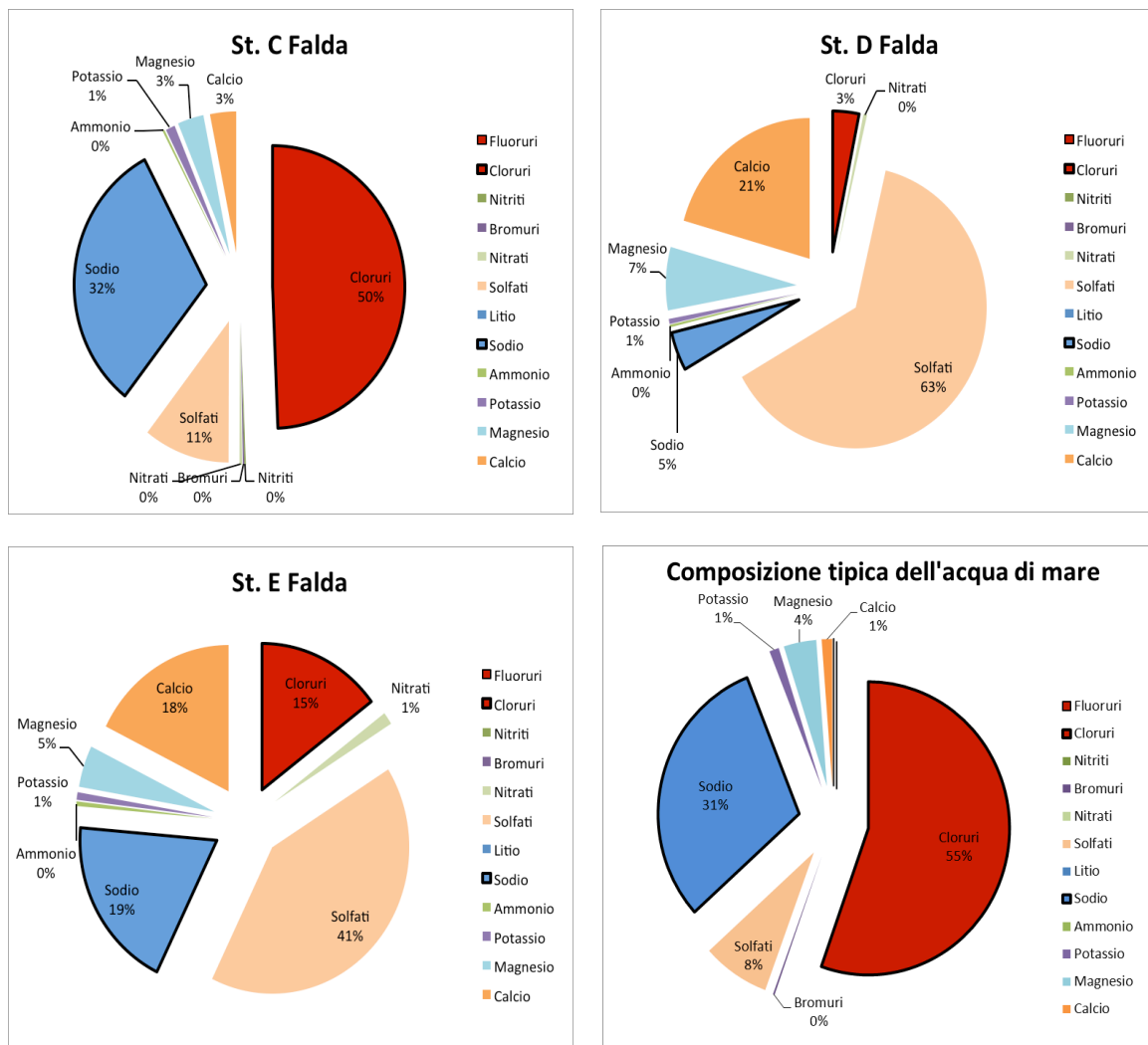


Figura 3.25 - Composizione dell'acqua di falda prelevata dai piezometri e della tipica acqua marina (Millero, 1996).

La notevole eterogeneità di questi risultati è dovuta sia alla diversa collocazione spaziale delle stazioni (diversa altezza di falda e maggiore o minore vicinanza alla laguna), sia alla composizione dei suoli (si passa da terreni sabbiosi a terreni franco-argillosi/limosi, e da terreni con alti contenuti di sostanza organica, ad altri in cui è quasi assente).

La falda della stazione C risulta quella maggiormente soggetta all'intrusione di un'acqua tipicamente marina, in quanto è localizzata sul lato più vicino alla laguna e presenta una falda molto superficiale. La composizione dell'acqua di falda è, pertanto, molto simile a quella dell'acqua di mare (Fig. 3.25).

La stazione D risulta invece caratterizzata da una falda con un minor contenuto di cloruri e sodio; si colloca infatti sul lato più lontano rispetto alla laguna, e può quindi essere

influenzata da sorgenti d'acqua dolce che, essendo meno densa rispetto a quella salata, vi scorre sopra e va ad influenzare gli stati più superficiali.

Analizzando infine la composizione dell'acqua delle stazioni A, B ed E, prelevate rispettivamente alle profondità medie di 74, 115 e 142 cm, è possibile rilevare una moderata salinità, dovuta sia all'altezza da cui è stato prelevato il campione (più in profondità rispetto alle altre), sia alle caratteristiche del suolo.

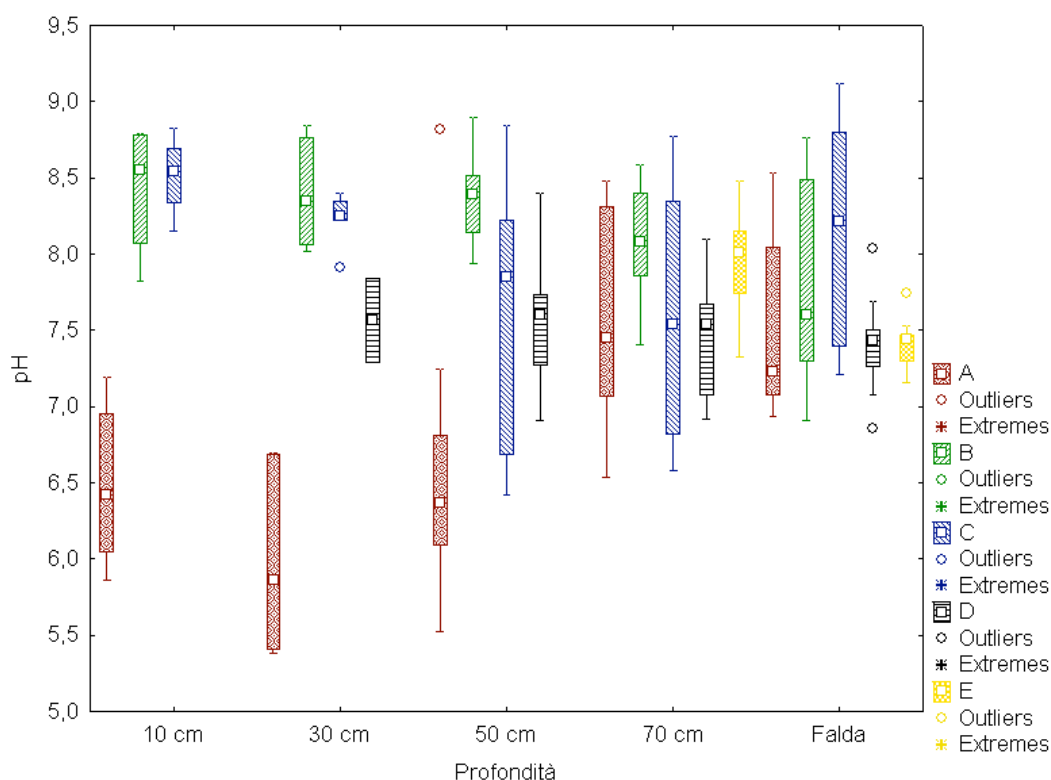


Figura 3.26 - Rappresentazione dell'andamento del pH nelle cinque stazioni rispetto alla profondità

Tabella 3.3 - Risultati del test non parametrico di Kruskal Wallis per il pH: in rosso sono evidenziate le differenze significative ( $p < 0.05$ )

pH	A 10	B 10	C 10	A 30	B 30	C 30	D 30	A 50	B 50	C 50	D 50	A 70	B 70	C 70	D 70	E 70	A Falda	B Falda	C Falda	D Falda	E Falda
A 10		0.081	0.007	1.000	0.014	0.105	1.000	1.000	0.002	1.000	1.000	1.000	0.042	1.000	1.000	0.724	1.000	0.778	0.023	1.000	1.000
B 10	0.081		1.000	0.025	1.000	1.000	1.000	0.024	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
C 10	0.007	1.000		0.002	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.721	1.000	1.000	0.475	1.000	0.275	1.000	1.000	0.380	0.349
A 30	1.000	0.025	0.002		0.003	0.028	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.008	0.924	1.000	0.219	1.000	0.205	0.004	1.000	1.000
B 30	0.014	1.000	1.000	0.003		1.000	1.000	0.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.934	1.000	0.556	1.000	1.000	0.750	0.689
C 30	0.105	1.000	1.000	0.028	1.000		1.000	0.016	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D 30	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
A 50	1.000	0.024	0.000	1.000	0.001	0.016	1.000		0.000	1.000	1.000	1.000	0.001	0.716	1.000	0.170	1.000	0.080	0.000	1.000	1.000
B 50	0.002	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.000		0.520	1.000	0.370	1.000	0.520	0.233	1.000	0.050	1.000	1.000	0.174	0.156
C 50	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.520		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D 50	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
A 70	1.000	1.000	0.721	1.000	1.000	1.000	1.000	0.370	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
B 70	0.042	1.000	1.000	0.008	1.000	1.000	1.000	0.001	1.000	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
C 70	1.000	1.000	1.000	0.924	1.000	1.000	1.000	0.716	0.520	1.000	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D 70	1.000	1.000	0.475	1.000	0.934	1.000	1.000	0.233	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
E 70	0.724	1.000	1.000	0.219	1.000	1.000	1.000	0.170	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
A Falda	1.000	1.000	0.275	1.000	0.556	1.000	1.000	1.000	0.050	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		0.788	1.000	1.000
B Falda	0.778	1.000	1.000	0.205	1.000	1.000	1.000	0.080	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000
C Falda	0.023	1.000	1.000	0.004	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.788	1.000	1.000		1.000
D Falda	1.000	1.000	0.380	1.000	0.750	1.000	1.000	0.174	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
E Falda	1.000	1.000	0.349	1.000	0.689	1.000	1.000	0.156	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Per quanto riguarda l'andamento del pH, la stazione A risulta quella con valori più bassi, in particolare negli strati superficiali, in quanto i valori di mediana si discostano in maniera significativa da B e C ( $p < 0.05$ ). Alle profondità di 70 cm e di falda, invece, i valori in apparenza aumentano, ma senza evidenziare differenze significative.

Rispetto alla posizione geografica, anche la stazione D si trova nell'area con suoli acidi (pH 4.6-5.2) come confermato dall'andamento del grafico, mentre i valori più elevati si riscontrano superficialmente nelle stazioni B e C.

Si può notare come l'eterogeneità tra le diverse stazioni sia più marcata per gli strati superficiali, dove il valore del pH dipende in particolar modo dalle caratteristiche dei suoli (fig. 2.3). Con l'aumentare della profondità invece l'andamento del pH presenta un minor divario, verosimilmente per l'effetto dell'intrusione salina, che rende più omogenei i valori.

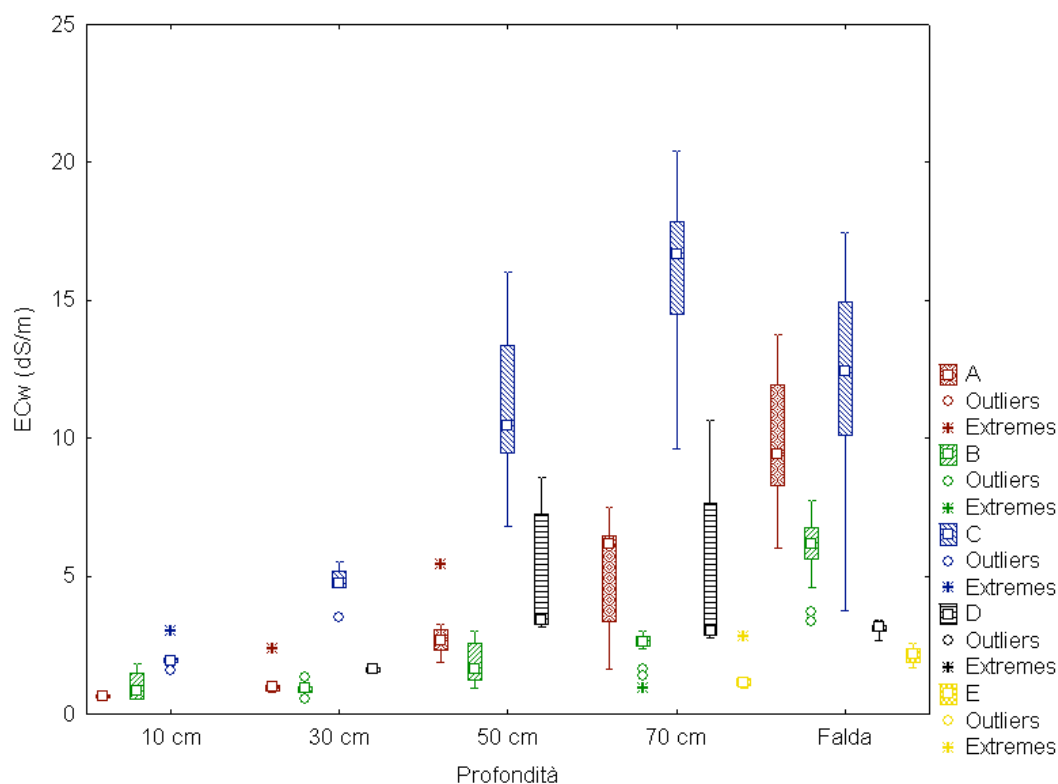


Figura 3.27 - Rappresentazione dell'andamento del  $EC_w$  nelle cinque stazioni rispetto alla profondità



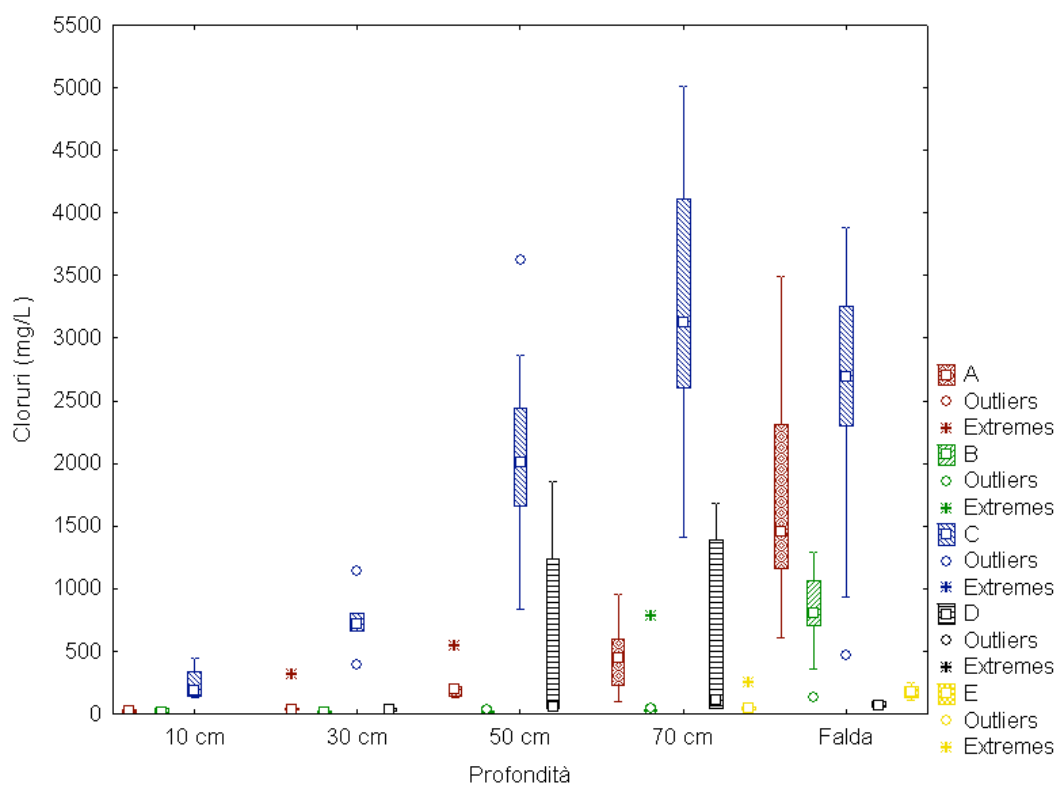
**Tabella 3.4** - Risultati del test non parametrico di Kruskal Wallis per l'EC<sub>w</sub>: in rosso sono evidenziate le differenze significative ( $p < 0.05$ )

EC <sub>w</sub>	A 10	B 10	C 10	A 30	B 30	C 30	D 30	A 50	B 50	C 50	D 50	A 70	B 70	C 70	D 70	E 70	A Falda	B Falda	C Falda	D Falda	E Falda
A 10		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.532	0.972	1.000	0.000	0.933	1.000	0.000	0.071	0.000	1.000	1.000
B 10	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.001	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.003	0.290	0.001	1.000	1.000
C 10	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.030	1.000	1.000	1.000	0.001	1.000	1.000	0.059	1.000	0.014	1.000	1.000
A 30	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.001	0.160	0.000	1.000	1.000
B 30	1.000	1.000	1.000	1.000		0.689	1.000	1.000	1.000	0.000	0.198	0.371	1.000	0.000	0.408	1.000	0.000	0.008	0.000	1.000	1.000
C 30	1.000	1.000	1.000	1.000	0.689		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.342	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D 30	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000	0.688	1.000	1.000	1.000	0.094	1.000	1.000	1.000	1.000	0.490	1.000	1.000
A 50	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		1.000	0.004	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.010	1.000	0.001	1.000	1.000
B 50	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		0.000	0.827	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.014	0.000	1.000	1.000
C 50	0.000	0.001	0.030	0.000	0.000	1.000	0.688	0.004	0.000		1.000	0.898	0.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.283	0.000
D 50	0.532	1.000	1.000	1.000	0.198	1.000	1.000	0.827	1.000	1.000		1.000	1.000	0.290	1.000	0.485	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
A 70	0.972	1.000	1.000	1.000	0.371	1.000	1.000	1.000	0.898	1.000	1.000		1.000	0.016	1.000	0.917	1.000	1.000	0.390	1.000	1.000
B 70	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000		0.000	1.000	1.000	0.000	0.602	0.000	1.000	1.000
C 70	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.342	0.094	0.000	0.000	1.000	0.290	0.016	0.000		0.118	0.000	1.000	0.087	1.000	0.005	0.000
D 70	0.933	1.000	1.000	1.000	0.408	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.118		0.994	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
E 70	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.485	0.917	1.000	0.000	0.994		0.000	0.016	0.000	1.000	1.000
A Falda	0.000	0.003	0.059	0.001	0.000	1.000	1.000	0.010	0.000	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.580	0.001
B Falda	0.071	0.290	1.000	0.160	0.008	1.000	1.000	1.000	0.014	1.000	1.000	0.602	0.087	1.000	0.016	1.000	1.000	1.000	1.000	0.574	0.000
C Falda	0.000	0.001	0.014	0.000	0.000	1.000	0.490	0.001	0.000	1.000	1.000	0.390	0.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.122	0.000	0.000
D Falda	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.283	1.000	1.000	1.000	0.005	1.000	1.000	0.580	1.000	0.122	1.000	1.000	1.000
E Falda	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.001	0.574	0.000	1.000	1.000	1.000

Valori molto elevati di conducibilità elettrica dell'acqua si notano soprattutto per la stazione C, in costante aumento rispetto alla profondità e con differenze significative ( $p < 0.05$ ) in particolare rispetto a B ed E.

Per quanto riguarda le altre stazioni invece, l'andamento è più regolare e in progressione rispetto alla profondità.

I valori minimi corrispondono alle stazioni B ed E, collocate in aree sabbiose, dove è maggiore l'effetto della percolazione e inferiore quello legato alla risalita capillare, oltre al fatto che la falda si trova a profondità molto elevate.



**Figura 3.28** - Rappresentazione dell'andamento dei cloruri nelle cinque stazioni rispetto alla profondità

Tabella 3.5 - Risultati del test non parametrico di Kruskal Wallis per i cloruri: in rosso sono evidenziate le differenze significative ( $p < 0.05$ )

Cloruri	A 10	B 10	C 10	A 30	B 30	C 30	D 30	A 50	B 50	C 50	D 50	A 70	B 70	C 70	D 70	E 70	A Falda	B Falda	C Falda	D Falda	E Falda
A 10		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.003	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.010	0.420	0.000	1.000	1.000
B 10	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.025	1.000	1.000	1.000	0.001	1.000	1.000	0.067	1.000	0.004	1.000	1.000
C 10	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.691	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
A 30	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.052	1.000	1.000	1.000	0.002	1.000	1.000	0.157	1.000	0.006	1.000	1.000
B 30	1.000	1.000	1.000	1.000		0.394	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	0.591	1.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.009	0.000	1.000	1.000
C 30	1.000	1.000	1.000	1.000	0.394		1.000	1.000	0.084	1.000	1.000	0.684	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D 30	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000	0.935	1.000	1.000	1.000	0.150	1.000	1.000	1.000	1.000	0.341	1.000	1.000
A 50	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		0.523	0.268	1.000	1.000	1.000	0.004	1.000	1.000	0.899	1.000	0.018	1.000	1.000
B 50	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.084	1.000	0.523		0.000	0.516	0.065	1.000	0.000	0.281	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
C 50	0.003	0.025	1.000	0.052	0.000	1.000	0.935	0.268	0.000		0.905	1.000	0.000	1.000	1.000	0.004	1.000	1.000	0.012	0.366	1.000
D 50	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.516	0.905		1.000	1.000	0.026	1.000	1.000	1.000	1.000	0.102	1.000	1.000
A 70	1.000	1.000	1.000	1.000	0.591	1.000	1.000	1.000	0.065	1.000	1.000		0.818	0.023	1.000	1.000	1.000	1.000	0.101	1.000	1.000
B 70	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.684	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	0.818		0.000	1.000	1.000	0.000	0.002	0.000	1.000	1.000
C 70	0.000	0.001	0.691	0.002	0.000	1.000	0.150	0.004	0.000	1.000	0.026	0.023	0.000		0.053	0.000	1.000	0.276	1.000	0.000	0.008
D 70	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.281	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.053		1.000	1.000	0.205	1.000	1.000	1.000
E 70	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.004	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000		0.016	1.000	0.000	1.000	1.000
A Falda	0.010	0.067	1.000	0.157	0.000	1.000	1.000	0.899	0.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.016		1.000	1.000	0.041	1.000
B Falda	0.420	1.000	1.000	1.000	0.009	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.002	0.276	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000
C Falda	0.000	0.004	1.000	0.006	0.000	1.000	0.341	0.018	0.000	1.000	0.102	0.101	0.000	1.000	0.205	0.000	1.000	1.000		0.000	0.033
D Falda	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.012	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.041	1.000	0.000		1.000
E Falda	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.366	1.000	1.000	1.000	0.008	1.000	1.000	1.000	1.000	0.033	1.000	

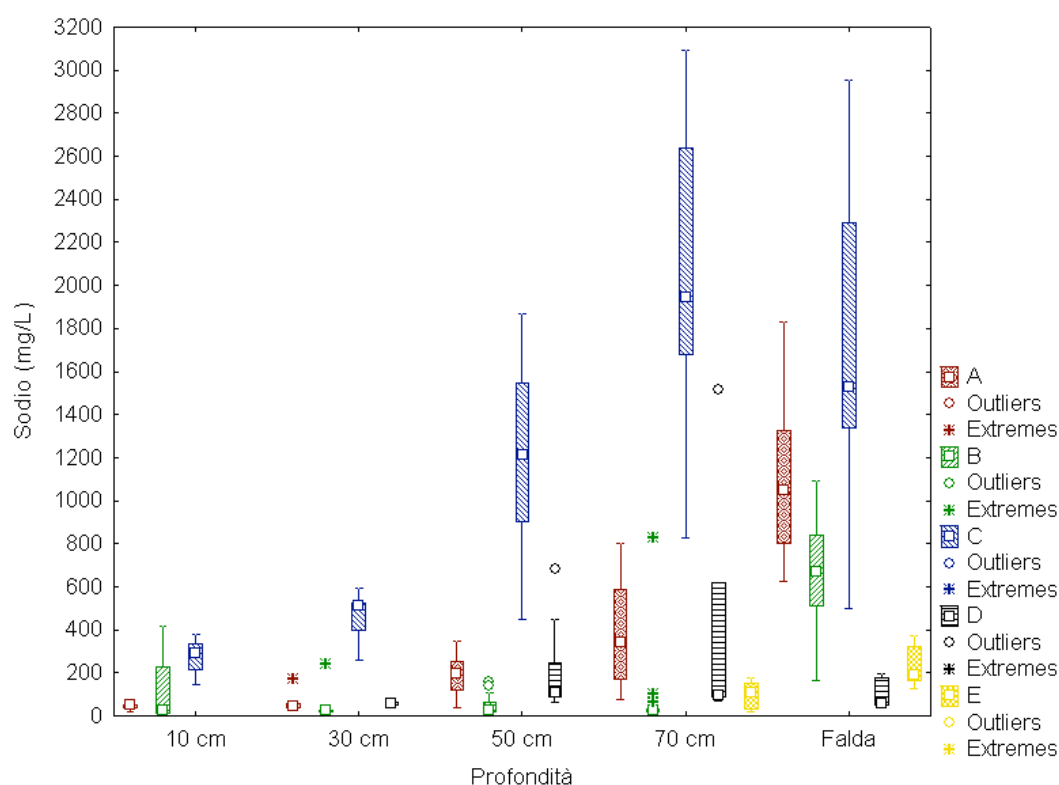


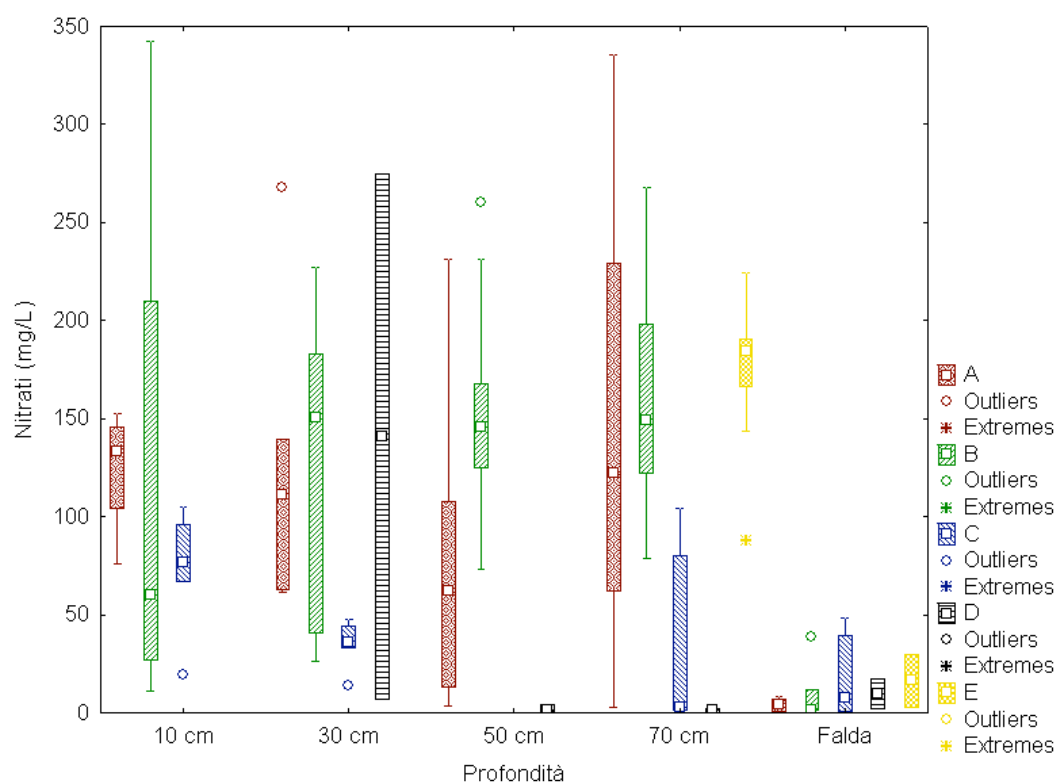
Figura 3.29 - Rappresentazione dell'andamento del sodio nelle cinque stazioni rispetto alla profondità

**Tabella 3.6** - Risultati del test non parametrico di Kruskal Wallis per il sodio: in rosso sono evidenziate le differenze significative ( $p < 0.05$ )

Sodio	A 10	B 10	C 10	A 30	B 30	C 30	D 30	A 50	B 50	C 50	D 50	A 70	B 70	C 70	D 70	E 70	A Falda	B Falda	C Falda	D Falda	E Falda
A 10		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.051	1.000	1.000	1.000	0.001	1.000	1.000	0.060	1.000	0.006	1.000	1.000
B 10	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.044	1.000	1.000	1.000	0.001	1.000	1.000	0.052	1.000	0.005	1.000	1.000
C 10	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
A 30	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.045	1.000	1.000	1.000	0.001	1.000	1.000	0.054	1.000	0.004	1.000	1.000
B 30	1.000	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	0.004	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.005	0.191	0.000	1.000	1.000
C 30	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000	0.750	1.000	1.000	0.777	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D 30	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.345	1.000	1.000	1.000	1.000	0.767	1.000	1.000
A 50	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		1.000	0.166	1.000	1.000	1.000	0.001	1.000	1.000	0.191	1.000	0.010	1.000	1.000
B 50	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.750	1.000	1.000		0.000	1.000	0.447	1.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
C 50	0.051	0.044	1.000	0.045	0.004	1.000	1.000	0.166	0.000		0.279	1.000	0.000	1.000	1.000	0.003	1.000	1.000	0.008	0.678	
D 50	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.279		1.000	1.000	0.003	1.000	1.000	0.327	1.000	0.020	1.000	1.000
A 70	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.447	1.000	1.000	1.000		0.420	0.026	1.000	1.000	1.000	1.000	0.165	1.000	1.000
B 70	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.777	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	0.420		0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
C 70	0.001	0.001	1.000	0.001	0.000	1.000	0.345	0.001	0.000	1.000	0.003	0.026	0.000		0.027	0.000	1.000	0.708	1.000	0.000	0.010
D 70	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.027		1.000	1.000	1.000	0.148	1.000	1.000
E 70	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.003	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000		0.003	0.296	0.000	1.000	1.000
A Falda	0.060	0.052	1.000	0.054	0.005	1.000	1.000	0.191	0.000	1.000	0.327	1.000	0.000	1.000	1.000	0.003	1.000	1.000	0.009	0.805	
B Falda	1.000	1.000	1.000	1.000	0.191	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.708	1.000	0.296	1.000	1.000	0.683	1.000	1.000
C Falda	0.006	0.005	1.000	0.004	0.000	1.000	0.767	0.010	0.000	1.000	0.020	0.165	0.000	1.000	0.148	0.000	1.000	1.000	0.000	0.058	
D Falda	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.008	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.009	0.683	0.000	1.000	1.000
E Falda	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.678	1.000	1.000	1.000	1.000	0.010	1.000	1.000	0.805	1.000	0.058	1.000	1.000

Per quanto riguarda l'andamento dei cloruri e del sodio, valgono le stesse considerazioni effettuate per l'EC<sub>w</sub>, che ne risulta direttamente influenzato.

La stazione C infatti presenta i valori maggiori, con valori più alti rispetto a quelli di falda per la profondità di 70 cm.



**Figura 3.30** - Rappresentazione dell'andamento dei nitrati nelle cinque stazioni rispetto alla profondità

Le considerazioni fatte finora non risultano valide se riferite alla concentrazione di nitrati rilevata nelle acque che, a differenza di  $EC_w$ , cloruri e sodio, è influenzata essenzialmente dalla gestione dei fertilizzanti nelle diverse aree e indipendente dalla salinità.

In questo caso infatti i valori più elevati si riscontrano nelle stazioni B ed E, situate nei due paleoalvei e caratterizzate da una maggiore lisciviazione dei nitrati.

### 3.2.3 Risultati della PCA

Dall'analisi statistica delle componenti principali (PCA) vengono discriminati tre fattori:

- il primo, legato alla conducibilità, comprende principalmente i cloruri, il sodio e il magnesio, e spiega la più alta porzione della varianza totale, in questo caso il 45.56 %;
- il secondo, legato alla presenza di solfato e di calcio, spiega il 17.97% della variabilità;
- il terzo, legato all'altezza di falda e al contenuto idrico volumetrico, spiega il restante 14.9% della variabilità.

Geometricamente, l'obiettivo della PCA è presentare i dati nel riferimento che evidenzia maggiormente la loro struttura, riducendo il numero di variabili da considerare e scartando quindi le componenti che contribuiscono poco alla variabilità osservata.

*Tabella 3.7* - Identificazione dei tre fattori principali mediante l'analisi di correlazione tra parametri: in rosso sono evidenziati i parametri più significativi per ogni fattore.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Altezza Falda	0,604	-0,144	-0,688
Ecw dS/m	0,806	0,011	0,055
VWC	0,666	-0,155	-0,555
Cloruri	0,813	-0,208	0,271
Nitrati	-0,570	-0,206	0,425
Solfati	0,477	0,771	-0,123
Sodio	0,853	-0,316	0,284
Potassio	0,686	-0,424	0,446
Magnesio	0,802	0,316	0,262
Calcio	0,207	0,832	0,299

I fattori, estratti come componenti principali, hanno le seguenti caratteristiche:

- sono tra loro intercorrelati;
- il primo fattore tiene conto dell'ammontare maggiore di varianza;
- il secondo fattore tiene conto dell'ammontare maggiore di varianza al netto del primo, etc...;
- i fattori estratti, nel loro complesso, forniscono lo stesso contributo informativo delle variabili originali (Neri L., 2010-2011).

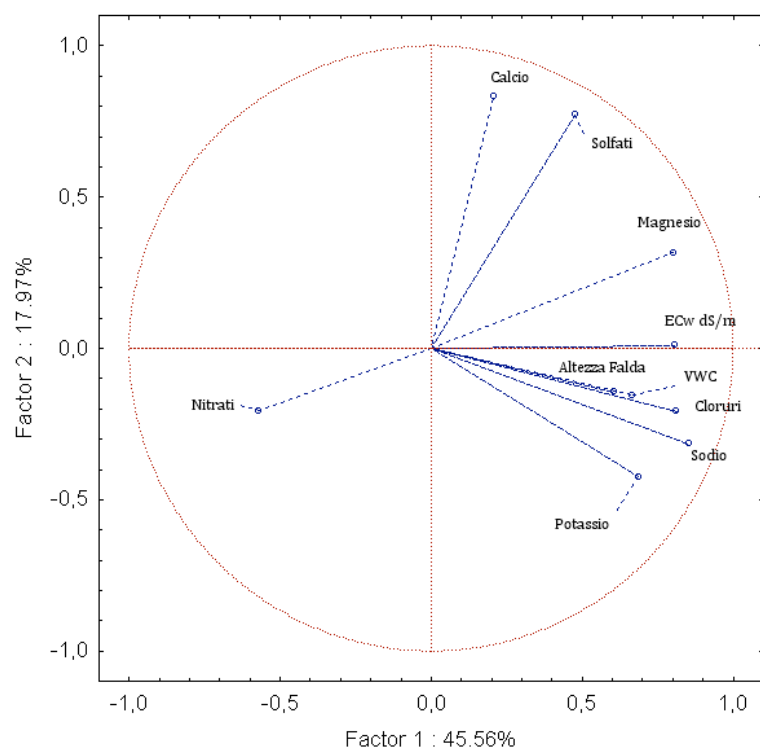


Figura 3.31 A - Proiezione delle variabili nel piano dei fattori 1 e 2 in seguito a PCA

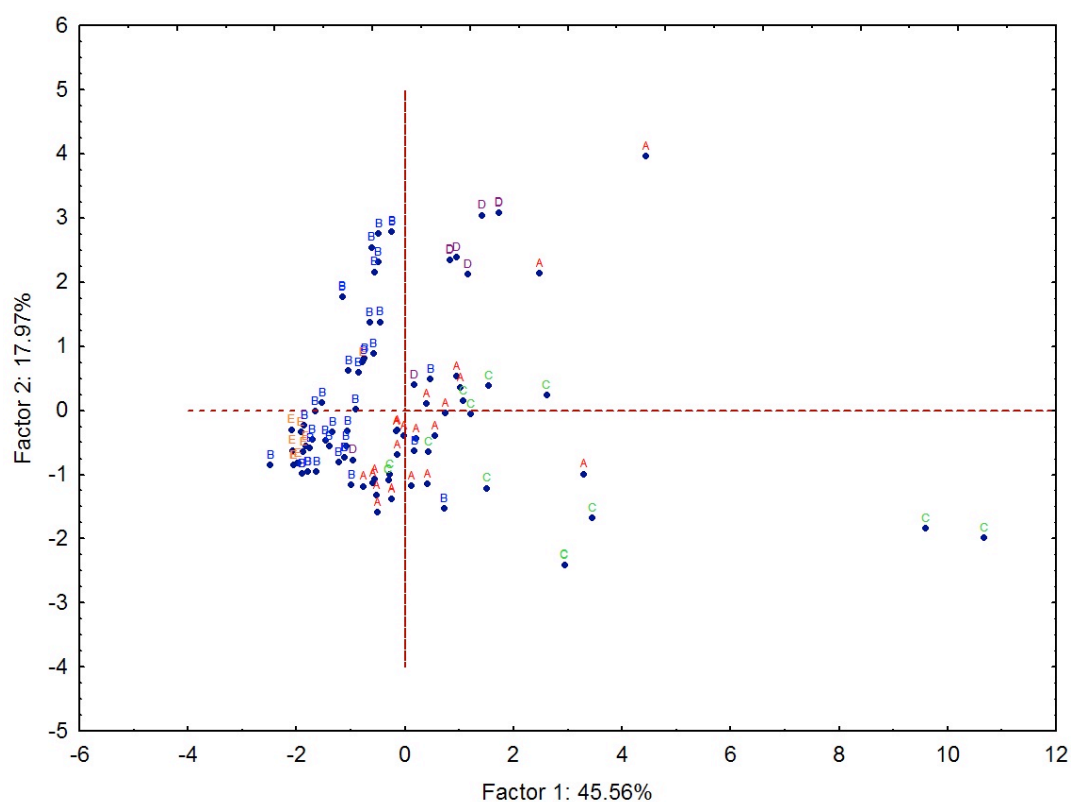


Figura 3.31 B - Proiezione dei casi nel piano dei fattori 1 e 2 in seguito a PCA

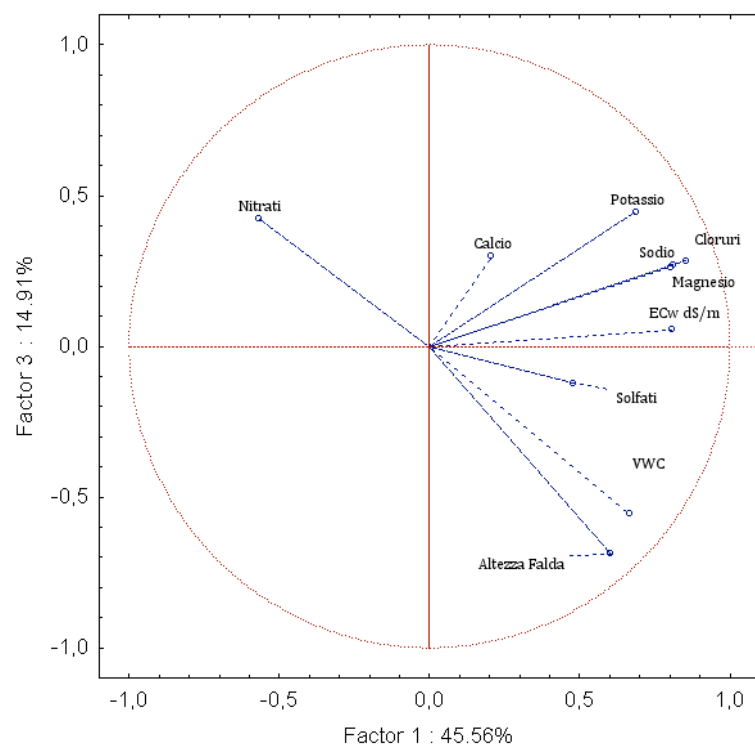


Figura 3.32 A - Proiezione delle variabili nel piano dei fattori 1 e 2 in seguito a PCA

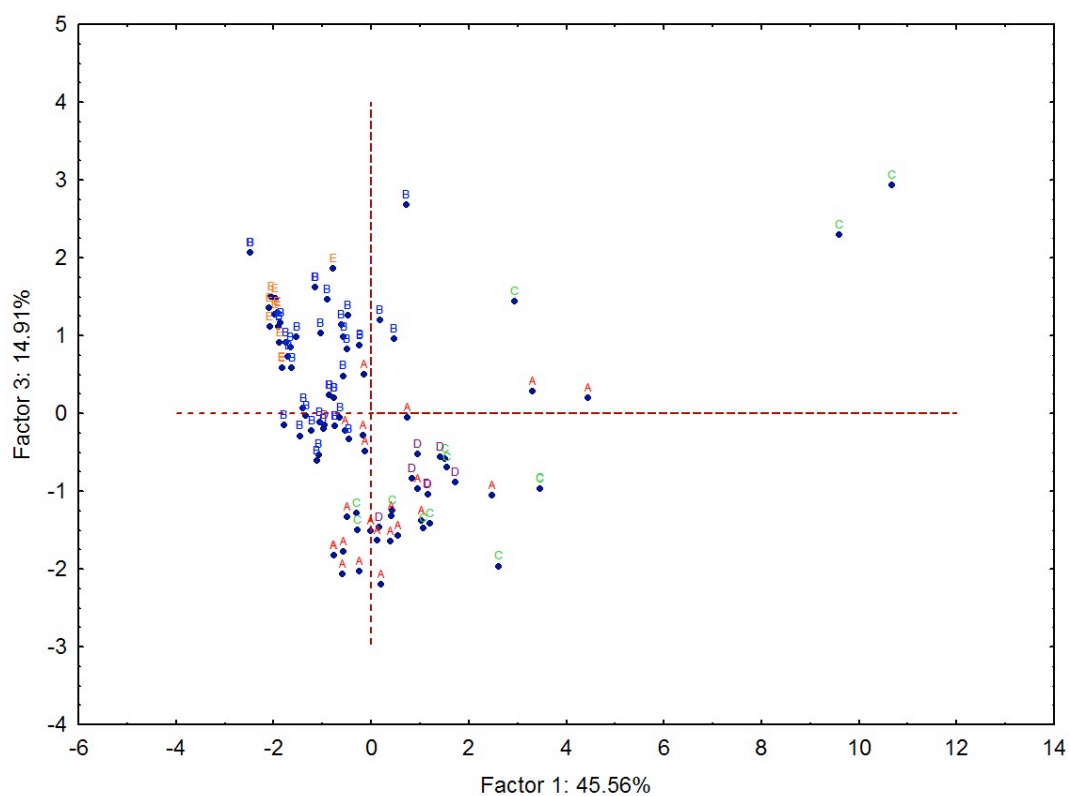


Figura 3.32 B - Proiezione dei casi nel piano dei fattori 1 e 2 in seguito a PCA

Dal grafico in figura 3.31 A, che spiega la relazione dei parametri verso i fattori 1 e 2, si può osservare come l'EC<sub>w</sub>, il sodio e i cloruri siano raggruppati nell'area di destra, attorno ad un valore di circa 0.9, con valori di correlazione significativi, pari rispettivamente a 0.806; 0.853; 0,823.

Più discostati, ma vicini fra loro, il calcio e i solfati, rispettivamente legati al fattore 2 con valori di 0.832 e 0.771; questi due elementi non dipendono dalla salinità dell'acqua di intrusione, e potrebbero quindi essere caratteristici della natura pedologica dei suoli.

I nitrati infine appaiono correlati negativamente sia al fattore 1 che al fattore 2, e risultano inversamente proporzionali all'altezza di falda e all'umidità, aspetto ben visibile anche dalla figura 3.32 A, che mette in evidenza i fattori 1 e 3.

Dalla sovrapposizione della figura 3.32 B (in cui si mette in evidenza la disposizione delle stazioni in relazione ai fattori 1 e 3) con la figura 3.32 A, si può osservare come le stazioni B ed E, poste lungo i due paleoalvei, siano quelle maggiormente influenzate da alte concentrazioni di nitrati; questo è spiegato dalla maggior lisciviazione nei terreni sabbiosi. Le stazioni A e C risultano invece maggiormente influenzate dal fattore 1, legato in particolar modo all'EC<sub>w</sub> e alla presenza di sodio e cloruri: si trovano infatti in zone in cui l'intrusione salina risulta più rilevante a causa di una maggiore altezza della falda.

Analizzando infine la distribuzione delle stazioni in relazione al fattore 2, quello cioè legato ai solfati e al calcio, si può notare come ne siano maggiormente interessate le stazioni A e D, poste nella parte bassa dell'appezzamento (a sud), e caratterizzate da suoli a pH acido. Questo può essere spiegato dall'origine pedologica dei suoli: l'intera area, prima della bonifica, risultava infatti sommersa dal mare, e il solfato di calcio, originariamente disciolto in acqua, si è depositato in seguito all'evaporazione. La maggiore presenza di solfato di calcio in queste due stazioni può derivare dal fatto che uno strato di materiale di riporto abbia ricoperto le altre tre (poste più a nord), al momento dello scavo del Canal Morto, quindi, un profilo di suolo con queste caratteristiche, potrebbe semplicemente trovarsi più in profondità e non essere stato considerato in questa indagine.



### 3.3 Applicazione del modello di Archie

Come presentato nei capitoli precedenti, le sonde Decagon 5TE installate nelle stazioni riportano la misura della conducibilità elettrica apparente del terreno ( $EC_a$ ), che deriva dal contributo delle tre fasi che lo costituiscono, invece l' $EC_w$  misurata dai campioni dell'acqua prelevata dai microlisimetri dà una misura della conducibilità elettrica della sola soluzione circolante.

La figura 3.33 mostra la relazione tra  $EC_a$  ed  $EC_w$  alle diverse profondità nelle stazioni considerate, ed evidenzia come questi due parametri siano in relazione tra loro. Inoltre, come mostrato nella figura successiva (3.34), oltre che dall' $EC_w$ , l' $EC_a$  risulta influenzata anche dal contenuto idrico del suolo.

Il primo passaggio per poter stimare correttamente l' $EC_w$ , a partire dai valori di  $EC_a$ , è quindi quello di conoscere il grado di saturazione, che può essere ottenuto prendendo in considerazione l'umidità volumetrica e la porosità del suolo.

La conoscenza dei valori di conducibilità elettrica della soluzione circolante è molto utile nella gestione delle colture agrarie: le radici delle piante estraggono infatti le loro sostanze nutrienti dalla soluzione del suolo, ne assorbono i soluti e consumano l'acqua attraverso il processo di traspirazione.

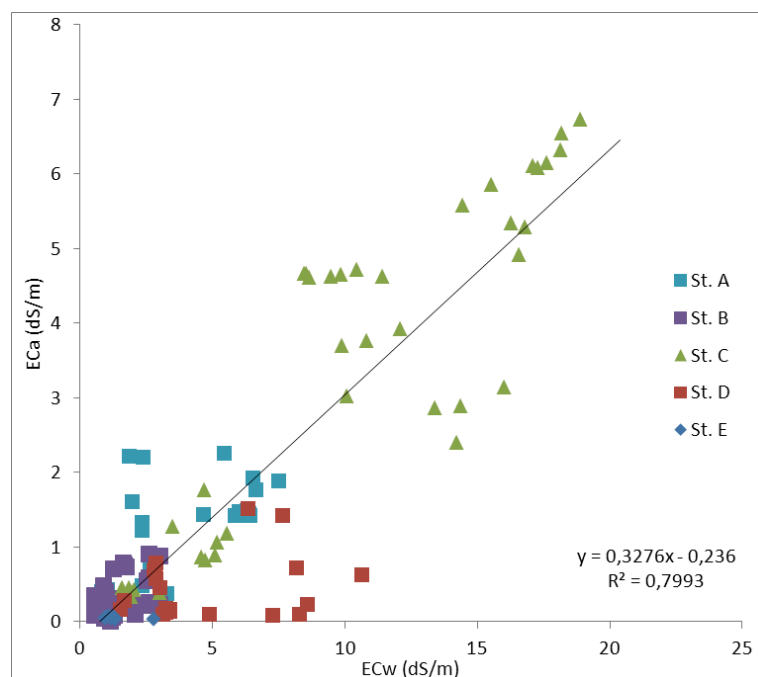


Figura 3.33 - Grafico di correlazione tra  $EC_a$  (rilevato dalle sonde 5TE) ed  $EC_w$  della soluzione circolante prelevata, sono stati considerati i dati relativi a tutte le stazioni e a tutte le profondità

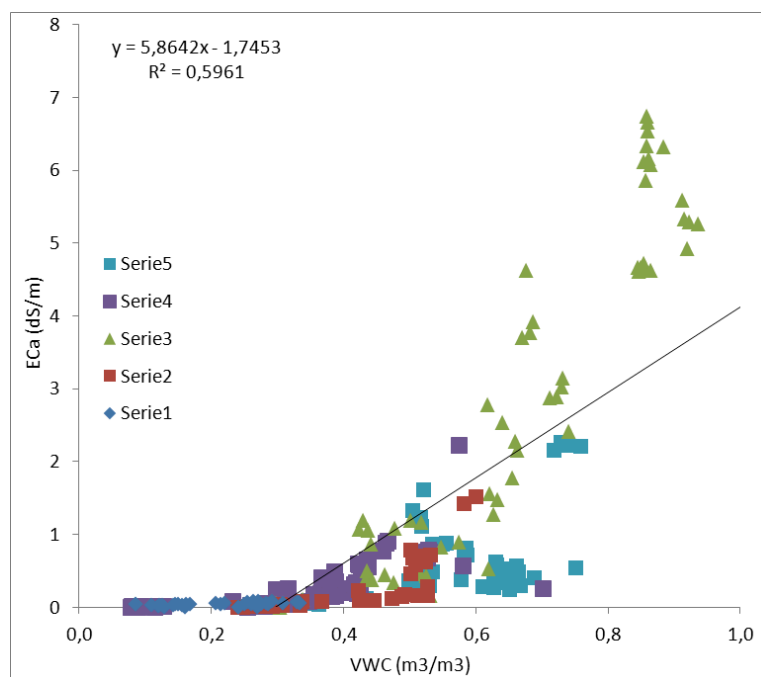


Figura 3.34 - Grafico di correlazione tra  $EC_a$  e VWC rilevato dalle sonde 5TE; sono stati considerati i dati relativi a tutte le stazioni e a tutte le profondità

### 3.3.1 Confronto tra il modello di Topp ed uno ottimizzato per la stima del contenuto idrico volumetrico

Il modello di Topp (1980) risulta valido per la maggior parte dei suoli, ma non del tutto adatto per quelli ad elevata salinità, in quanto è stato dimostrato che la dipendenza delle proprietà dielettriche del suolo dal contenuto idrico è più complessa (Gardner et al., 2000) e rende necessaria una calibrazione specifica per ciascun suolo.

Per il calcolo del contenuto idrico volumetrico, si propone quindi il confronto tra il modello di Topp ed uno ottimizzato per i suoli ad elevata salinità (Scudiero et al., 2012).

#### 3.3.1.1 Relazione tra umidità volumetrica osservata e quella calcolata con la relazione di Topp

I valori di contenuto idrico volumetrico ottenuti dalla sonda 5TE della Decagon, che mediante la relazione empirica di Topp lega la misura della permittività elettrica apparente ( $\epsilon_a$ ) al contenuto volumetrico d'acqua ( $\theta$ ), sono stati confrontati con i valori

dell'umidità volumetrica osservata, ottenuta dai dati di potenziale matriciale grazie ai grafici di risalita capillare, per verificare se la stima mediante la relazione di Topp possa risultare valida per questa tipologia di suoli.

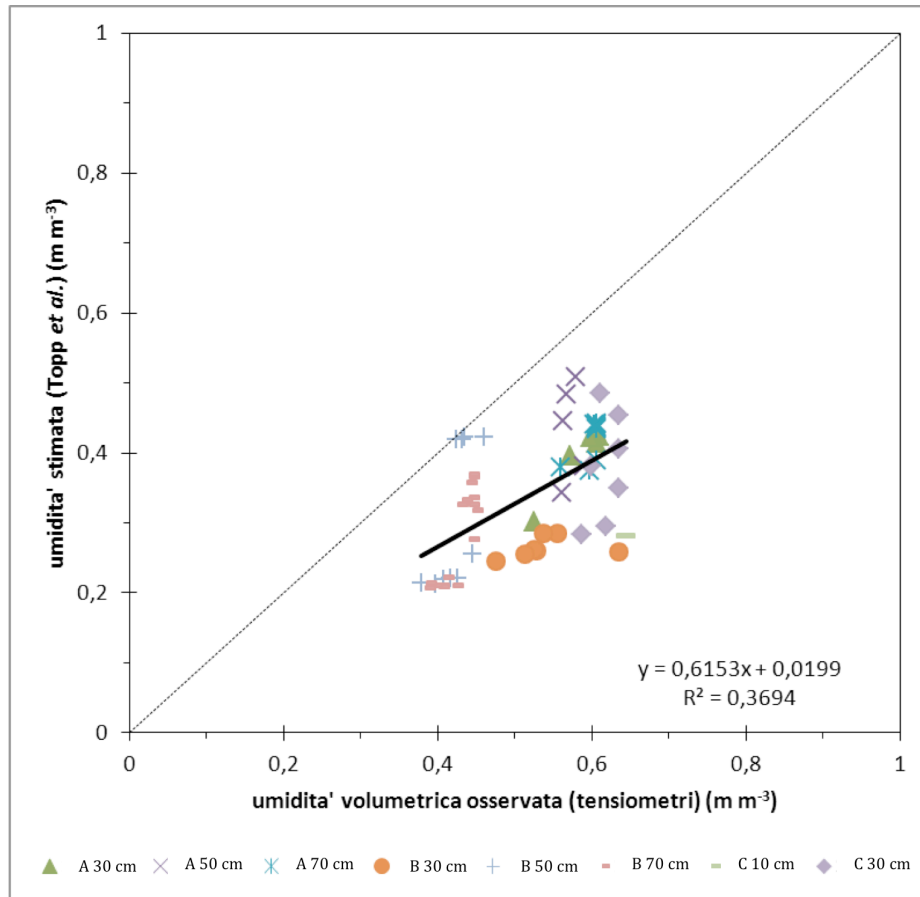


Figura 3.35 - Grafico dei valori di umidità volumetrica stimata contro i valori osservati, utilizzando l'equazione di Topp et al. 1980, per i suoli delle stazioni A e B a 30, 50 e 70 cm, e per la stazione C a 10, 30, 50 e 70 cm.

Dal grafico della figura 3.35 possiamo osservare che, confrontando i valori di umidità volumetrica misurata con quella calcolata mediante la formula di Topp (come proposto dalla casa madre dello strumento), si ottiene una sottostima dell'umidità: la retta ottenuta si colloca infatti nel riquadro in basso a destra, lontana dalla linea dell'1:1 e non parallela ad essa, indicando una differenza abbastanza marcata tra l'umidità calcolata e quella osservata.

La calibrazione di Topp risulta quindi inadatta per essere applicata a suoli molto salini o suoli in cui la soluzione circolante abbia un alto contenuto di sali, come riportato anche in letteratura (Pardossi et al., 2009).

### 3.3.1.2 Relazione tra umidità volumetrica osservata e quella calcolata mediante un modello *ad hoc*

Vista l'inapplicabilità della relazione di Topp, è stata proposta una calibrazione per il calcolo del grado di saturazione per terreni salini, che va a correggere i valori di  $\epsilon_a$  in base alle letture di  $EC_a$  e alle quantità di argilla, sabbia e SOC presenti nel suolo.

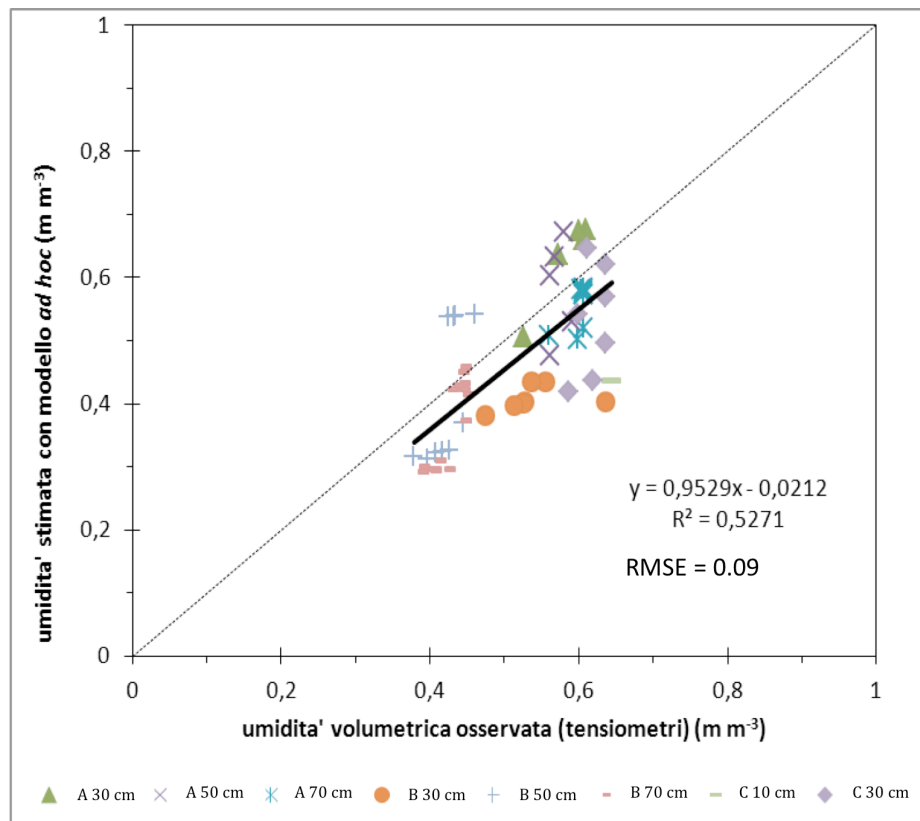


Figura 3.36 - Grafico dei valori di umidità volumetrica stimati contro i valori osservati, utilizzando l'equazione ottimizzata per i suoli di Ca' Bianca, per i suoli delle stazioni A e B a 30, 50 e 70 cm, e per la stazione C a 10, 30, 50 e 70 cm.

Il grafico in figura 3.36 rappresenta il confronto tra i valori di umidità volumetrica osservata e quelli dell'umidità calcolata mediante il modello *ad hoc* per i suoli indagati. In questo caso, i valori di umidità vengono sottostimati molto meno che in precedenza, e la retta risultante ha una pendenza quasi uguale a 1, indicando che le stime sono caratterizzate dallo stesso errore lungo tutto il range di valori. Il valore di  $R^2$  ottenuto risulta inoltre più alto rispetto al precedente, indicando un minor errore nella stima dei dati.

I parametri utilizzati nell'equazione, ricavati dalle calibrazioni effettuate in laboratorio sono illustrati nella tabella 3.8

$$\theta = \left( c' \cdot \text{soc} + c'' + \left( d' \cdot \frac{\text{argilla}}{\text{sabbia}} + d'' \right) \cdot EC_a \right) \cdot \left( 1 + q \cdot \ln(\varepsilon_a) \right) \quad eq. 3.1$$

Tabella 3.8 - Parametri per il calcolo del contenuto idrico volumetrico secondo la formula 3.1

parametri	valore
c'	0.006
c''	-0.352
d'	-0.009
d''	0.02
q	-0.766

### 3.3.1.3 Ottimizzazione dei parametri per il modello *ad hoc*

I parametri del modello proposto sono stati ulteriormente ottimizzati forzando la diminuzione della devianza residua tra valori osservati e stimati verso un valore minimo, dando la possibilità al programma utilizzato (Excel) di cambiare il valore dei parametri di fittaggio. Il risultato ottenuto viene illustrato in figura 3.37 e i parametri risultanti dall'ottimizzazione vengono riportati in tabella 3.9

Tabella 3.9 - Parametri ottimizzati per il calcolo del contenuto idrico volumetrico secondo l'equazione 3.1

parametri	valore
c'	0.0005
c''	-0.1218
d'	-0.0033
d''	0.0114
q	-1.9713

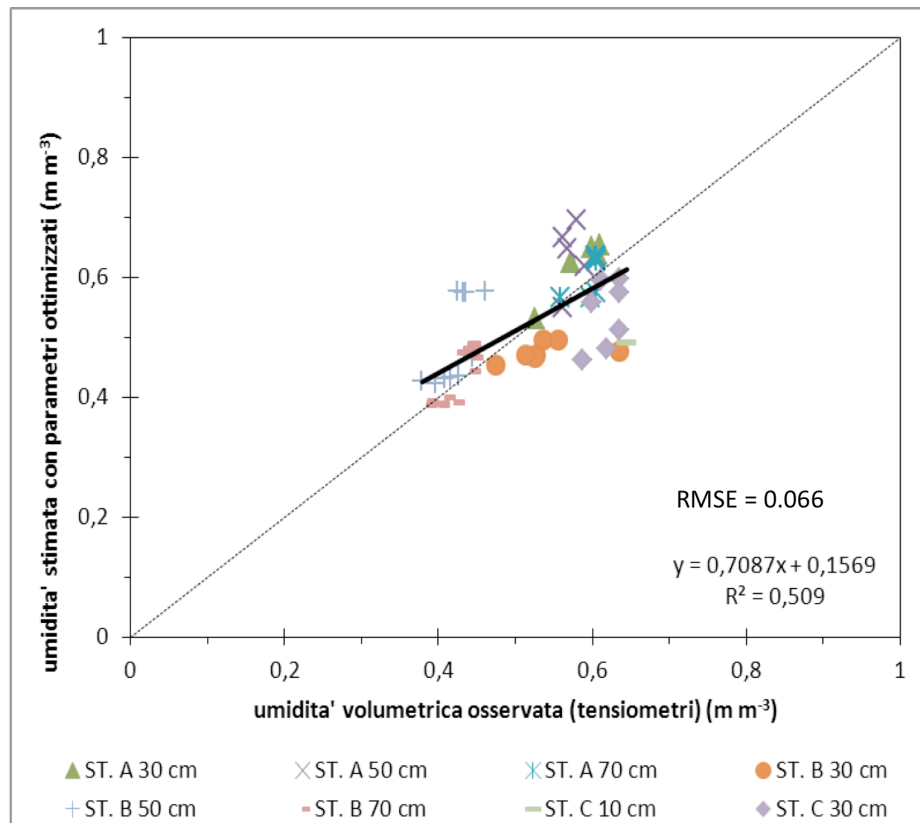


Figura 3.37 - Grafico dei valori di umidità volumetrica stimati contro i valori osservati, utilizzando l'equazione ah hoc per i suoli di Ca Bianca, con i parametri ottimizzati sulla base dei dati tensiometrici, per i suoli delle stazioni A e B a 30, 50 e 70 cm, e per la stazione C a 10, 30, 50 e 70 cm.

In questo caso (figura 3.37), non si osserva una sottostima o sovrastima, ma la pendenza della retta è molto diversa da 1; l'ottimizzazione ha infatti diminuito la devianza residua ma ha alterato la pendenza della retta ottenuta, differenziando quindi l'errore a seconda della stazione e della profondità considerata.

Dall'analisi dei 3 grafici possiamo affermare che il modello che meglio stima il contenuto idrico volumetrico risulta essere quello rappresentato nella figura 3.36, cioè il modello corretto mediante la lettura di  $EC_a$  e al contenuto di argilla, sabbia e SOC presenti nel suolo.

### 3.3.2 Confronto tra il modello di Archie e un modello di Archie ottimizzato per la stima dell' $EC_p$

Considerando che la legge di Archie fornisce un'interpretazione del comportamento della resistività di suoli sabbiosi e limosi e non dà in genere buoni risultati per terreni contenenti minerali argillosi o materia organica, si è considerato opportuno verificare l'applicabilità di un modello ottimizzato per la categoria di suoli in esame.

#### 3.3.2.1 Relazione tra i valori di $EC_p$ osservati ed $EC_p$ calcolati con la formula di Archie

Il modello di Archie, applicato a tutti i profili dei suoli, richiede un elevato numero di parametri, diversi a seconda delle caratteristiche chimico-fisiche del suolo.

Per poter verificare la validità di questo modello sono stati messi in relazioni i valori di  $EC_p$  ottenuti dall'analisi delle soluzioni circolanti (prelevate tramite i microlisimetri), con i valori di  $EC_p$  stimati con Archie, i risultati ottenuti sono illustrati nella figura seguente (3.38)

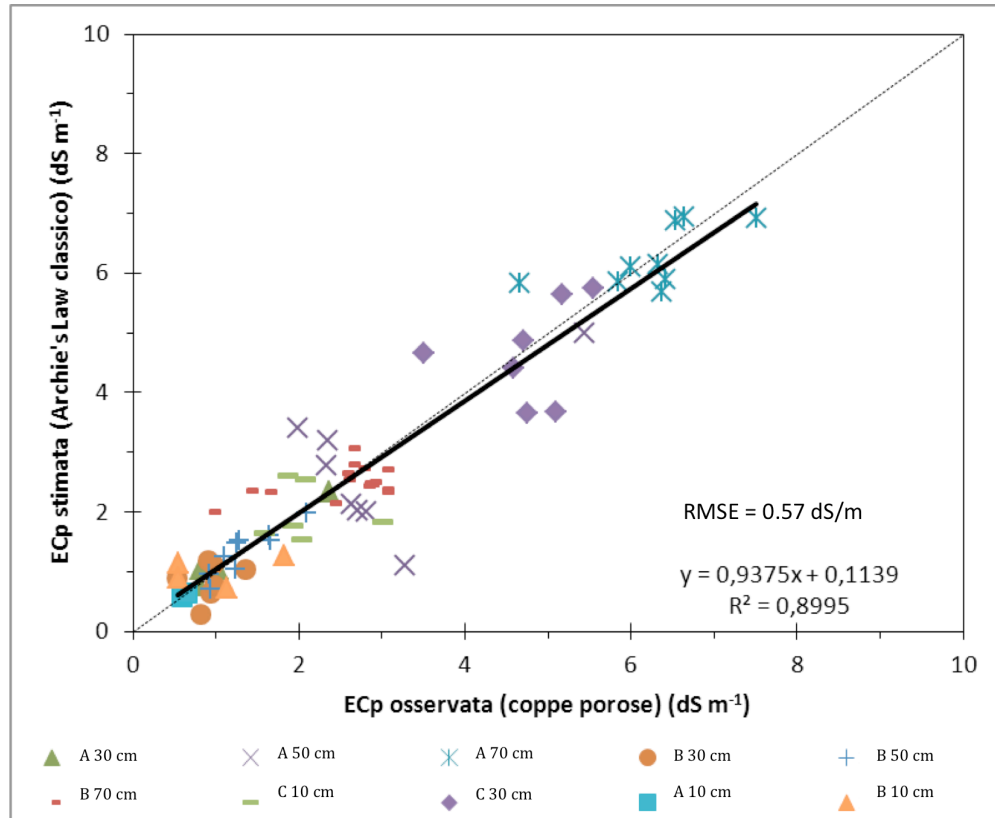


Figura 3.38 - Grafico dei valori di  $EC_p$  stimati contro i valori osservati, utilizzando la formulazione classica del modello di Archie, con i parametri ottimizzati in base ai valori di salinità delle soluzioni circolanti estratte.

La formula utilizzata per il calcolo dell'EC<sub>p</sub> è:

$$EC_p = k \cdot \frac{EC_b}{\phi^m \cdot S^n} \quad eq. 3.2$$

i parametri, a seconda delle caratteristiche del suolo, sono elencati in tabella 3.10

Tabella 3.10 Parametri per il calcolo dell'EC<sub>p</sub> secondo la formulazione di Archie (eq. 3.2)

	k	m	n
A10	1.863	2.75	-0.464
A30	2.001	12.177	3.939
A50	1.977	17.722	0.246
A70	2.69	17.73	1.124
B10	1.132	21.485	2.72
B30	16.246	21.076	-5.085
B50	2.103	5.017	5.284
B70	2.434	14.877	2.988
C10	1.08	21.537	3.104
C30	2.588	21.232	0.601

I valori di EC<sub>p</sub> stimati tramite questo modello mostrano un'elevata correlazione ( $R^2 = 0.89946$ ) con i valori di EC<sub>p</sub> reali. Dall'equazione della retta si può inoltre notare che la pendenza è molto vicina a quella della retta dell'1:1, indice anche in questo caso della bontà del modello.

Prendendo in considerazione i parametri utilizzati nell'equazione di Archie (eq. 3.2), si osserva che i valori ottenuti risultano molto diversi da quelli citati in letteratura, dove per suoli sabbiosi viene stimato un valore di  $n$  pari a 2. Se si procede con la correzione e l'ottimizzazione di tale parametro per i terreni esaminati, non tutti prevalentemente sabbiosi, anche i valori di  $k$  ed  $m$  subiranno lo stesso tipo di cambiamento, discostandosi dai valori comunemente usati.

### 3.3.2.2 Relazione tra i valori di EC<sub>p</sub> osservati e quelli calcolati con la formula di Archie ottimizzata

Nonostante i buoni risultati ottenuti dall'applicazione del modello di Archie, a causa dell'elevato numero dei parametri richiesti nell'elaborazione, si è ritenuto opportuno verificare l'attendibilità di un secondo modello, ottimizzato e semplificato, applicabile a



tutte le tipologie del suolo in esame; si è passati dai 30 parametri richiesti dalla formulazione di Archie, ai 6 richiesti per il modello ottimizzato; i risultati del confronto tra valori di  $EC_p$  stimati e osservati sono rappresentati in figura 3.39.

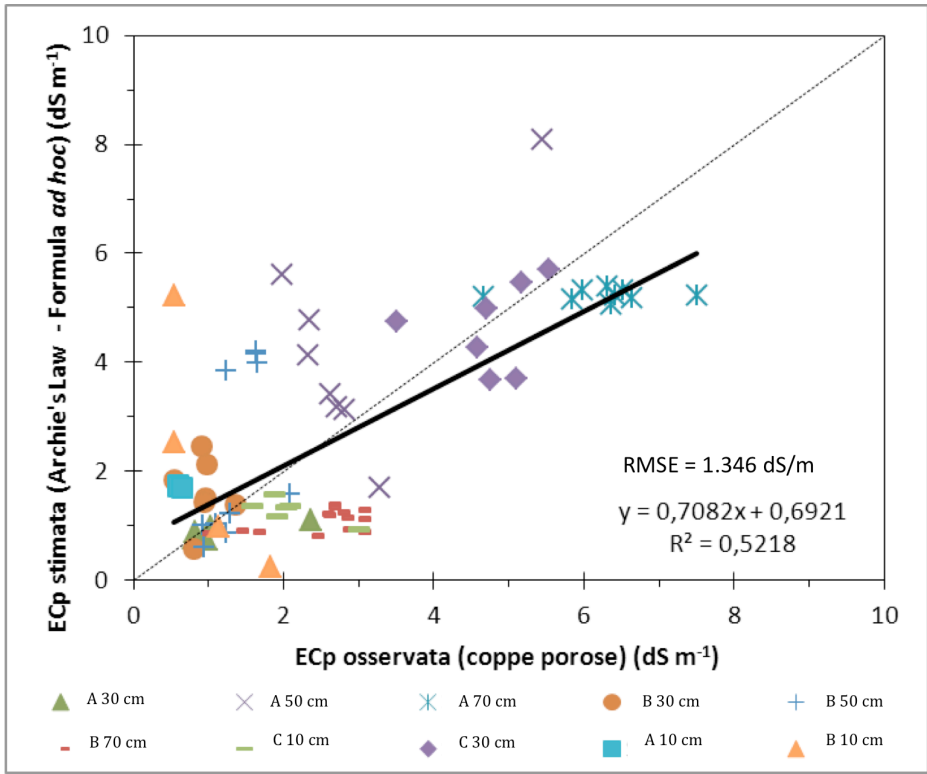


Figura 3.39 - Grafico dei valori di  $EC_p$  stimati contro i valori osservati, utilizzando la formulazione di Archie di Scudiero et al. (2012), con i parametri consigliati da tali autori, per i suoli delle stazioni A, B e C a 10, 30, 50 e 70 cm.

La formula utilizzata per la stima dell' $EC_p$  è:

$$EC_p = k \cdot \frac{EC_a}{\Phi \left( m'_{soc} + \frac{m''_{soc}}{soc + m'''} \right) \cdot S^{(n'_{sabbia} + n'')}} \quad eq. 3.3$$

Tabella 3.11 - Parametri utilizzati per la stima dell' $EC_p$  secondo il modello semplificato (eq. 3.3)

parametri	valore
k	0.487
m'	-0.018
m''	4.35
m'''	0.966
n'	0.035
n''	-0.669

### 3.3.2.3 Ottimizzazione dei parametri per il modello di Archie ottimizzato

Anche in questo caso, come per la stima del contenuto idrico volumetrico, i parametri del modello *ad hoc* sono stati ulteriormente ottimizzati forzando la diminuzione della devianza residua tra valori osservati e stimati verso un valore minimo; il risultato ottenuto è illustrato in figura 3.40 e i parametri risultanti dall'ottimizzazione vengono riportati nella tabella 3.12

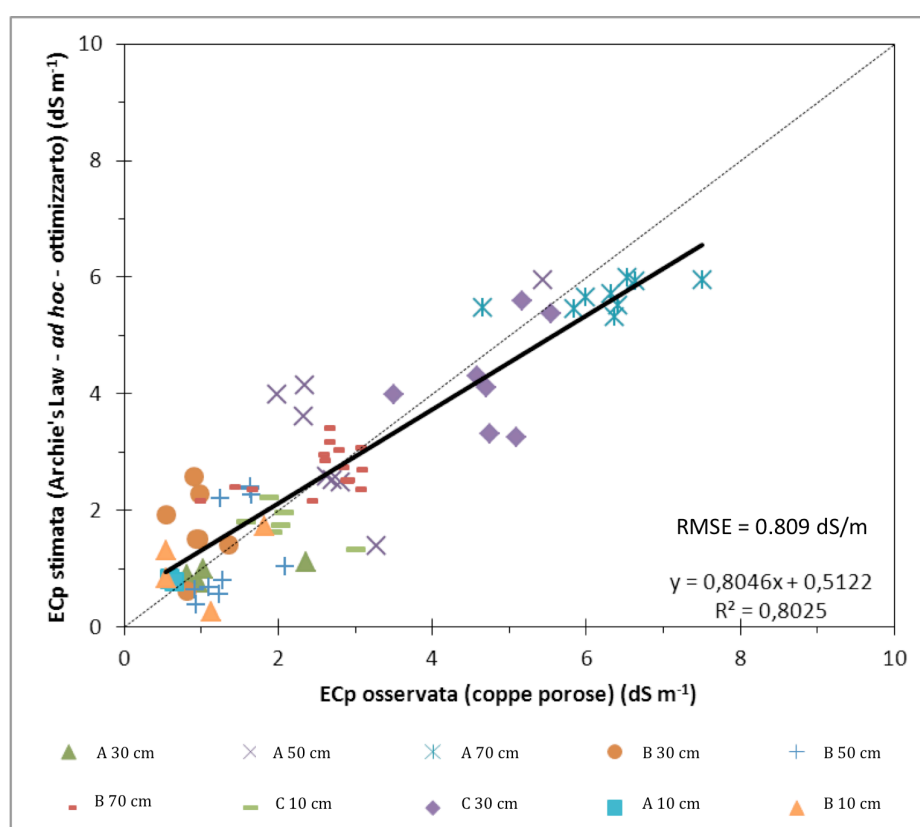


Figura 3.40 - Grafico dei valori di  $EC_p$  stimati contro i valori osservati, utilizzando la formulazione di Archie di Scudiero et al. (2012), con i parametri ottimizzati in base ai valori di salinità delle soluzioni circolanti estratte con le coppe porose, per i suoli delle stazioni A, B e C a 10, 30, 50 e 70 cm.

Tabella 3.12 - Parametri ottimizzati per il calcolo del contenuto idrico volumetrico secondo l'equazione 3.3

parametri	valore
k	2.816362
$m'$	-0.08268
$m''$	0.150253
$m'''$	2.400002
$n'$	0.030773
$n''$	-0.02314

Dall'analisi dei tre grafici possiamo affermare che il modello che stima meglio i valori di  $EC_p$  risulta essere quello di Archie (fig. 3.38), in quanto la pendenza della retta dei dati osservati contro quelli stimati è 0.93, mentre per il modello con i parametri ottimizzati risulta essere 0.87. Anche dai valori di RMSE e di  $R^2$  risulta più efficiente la formulazione classica di Archie, con valori di RMSE=0.57 dS/m e  $R^2=0.899$  per Archie, e RMSE=0.809 dS/m e  $R^2=0.802$  per la formula ottimizzata.

Nonostante questo, seppur con errori più alti rispetto al modello classico di Archie, quello rappresentato in fig. 3.39 risulta essere più veloce e di facile applicazione in quanto richiede un minor numero di parametri ed è estendibile a più tipologie di suolo.

### **3.3.3 Conducibilità elettrica dell'acqua dei pori calcolata attraverso il modello di Archie ottimizzato**

In quest'ultimo paragrafo vengono rappresentati i valori di  $EC_p$  ottenuti applicando il modello di Archie ottimizzato (adatto ai suoli di Ca' Bianca), a partire dai valori di  $EC_a$  e del contenuto idrico volumetrico registrati dalla sonda 5TE. Attraverso questa applicazione è possibile risalire ai livelli di salinità a cui le colture agrarie sono effettivamente esposte, e poter quindi valutare i casi in cui si raggiungono valori critici per la produzione.

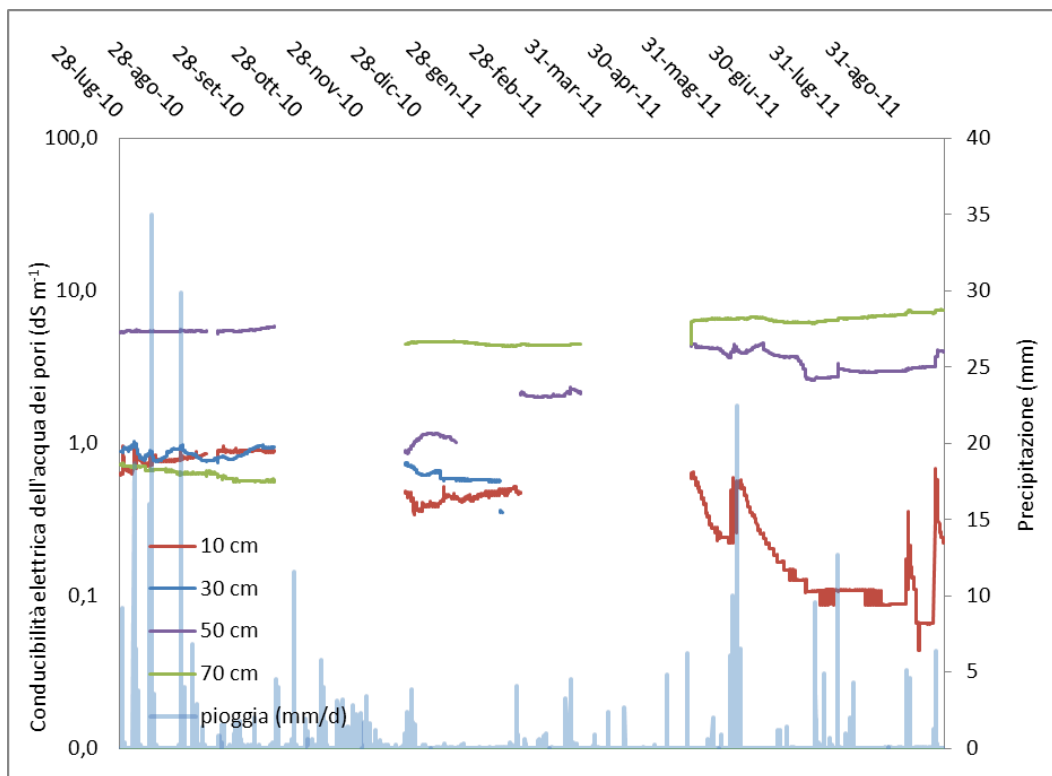


Figura 3.41 -  $EC_p$  (calcolata secondo il modello di Archie ottimizzato) per i tre periodi di campionamento nella stazione A in relazione alla piovosità (mm/d)

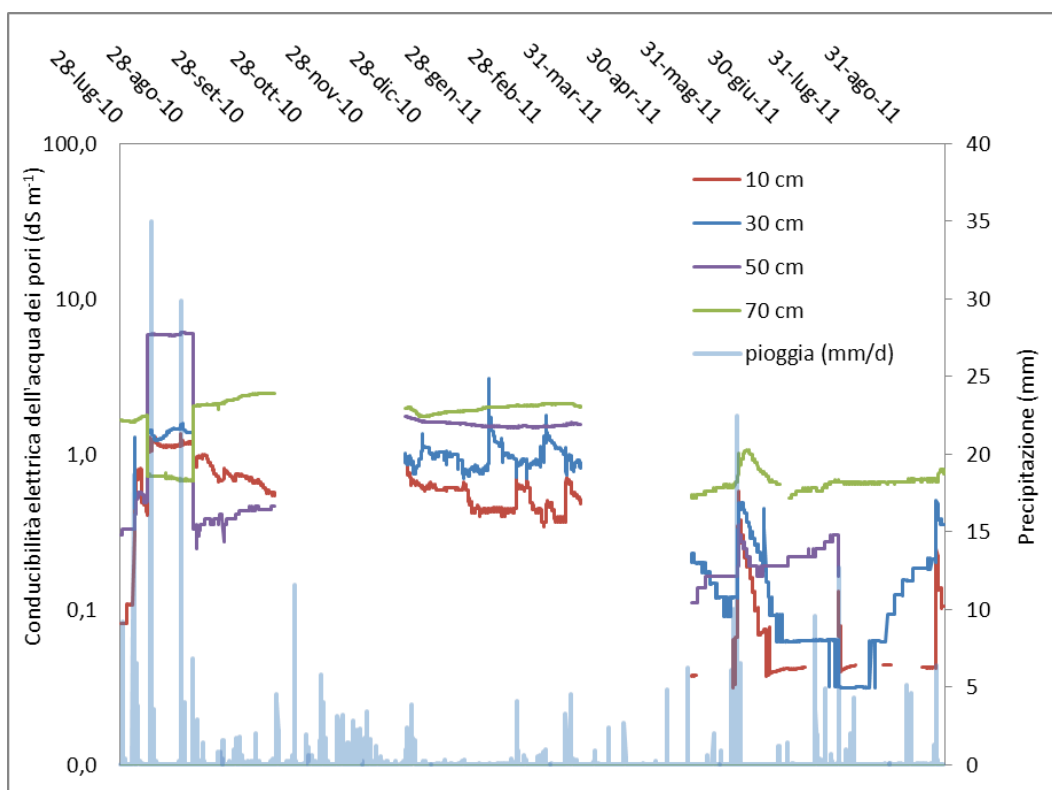


Figura 3.42 -  $EC_p$  (calcolata secondo il modello di Archie ottimizzato) per i tre periodi di campionamento nella stazione B in relazione alla piovosità (mm/d)

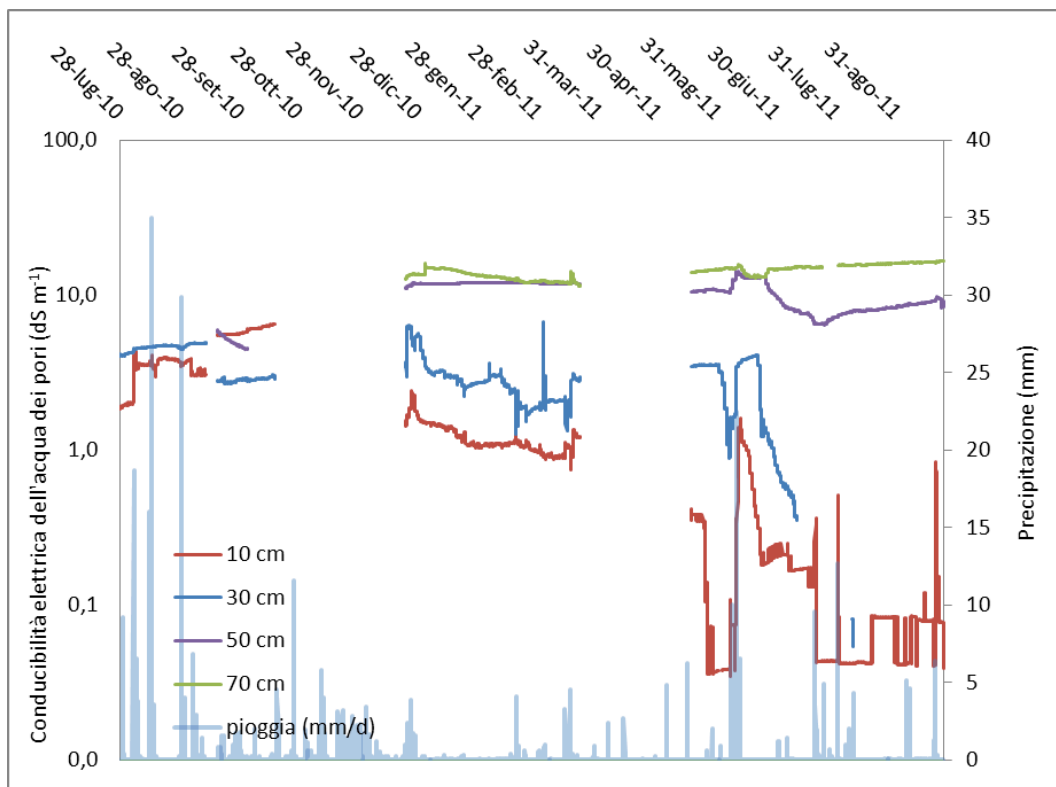


Figura 3.43 -  $EC_p$  (calcolata secondo il modello di Archie ottimizzato) per i tre periodi di campionamento nella stazione C in relazione alla piovosità (mm/d)

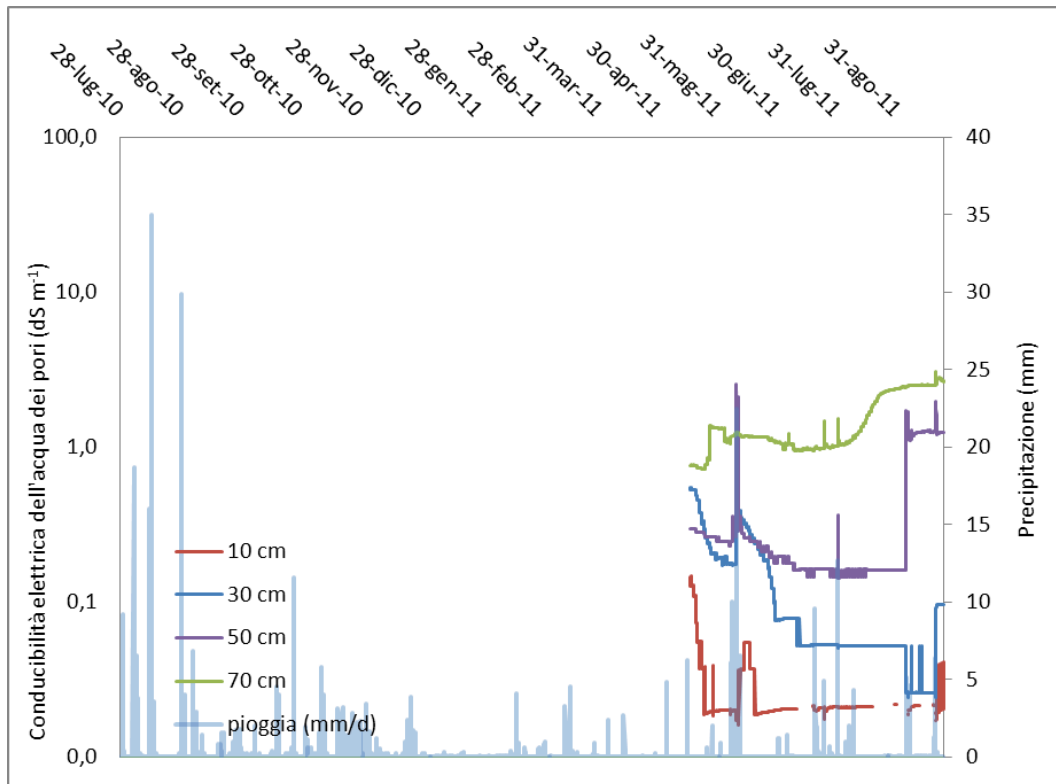


Figura 3.44 -  $EC_p$  (calcolata secondo il modello di Archie ottimizzato) per il terzo periodo di campionamento nella stazione D in relazione alla piovosità (mm/d)

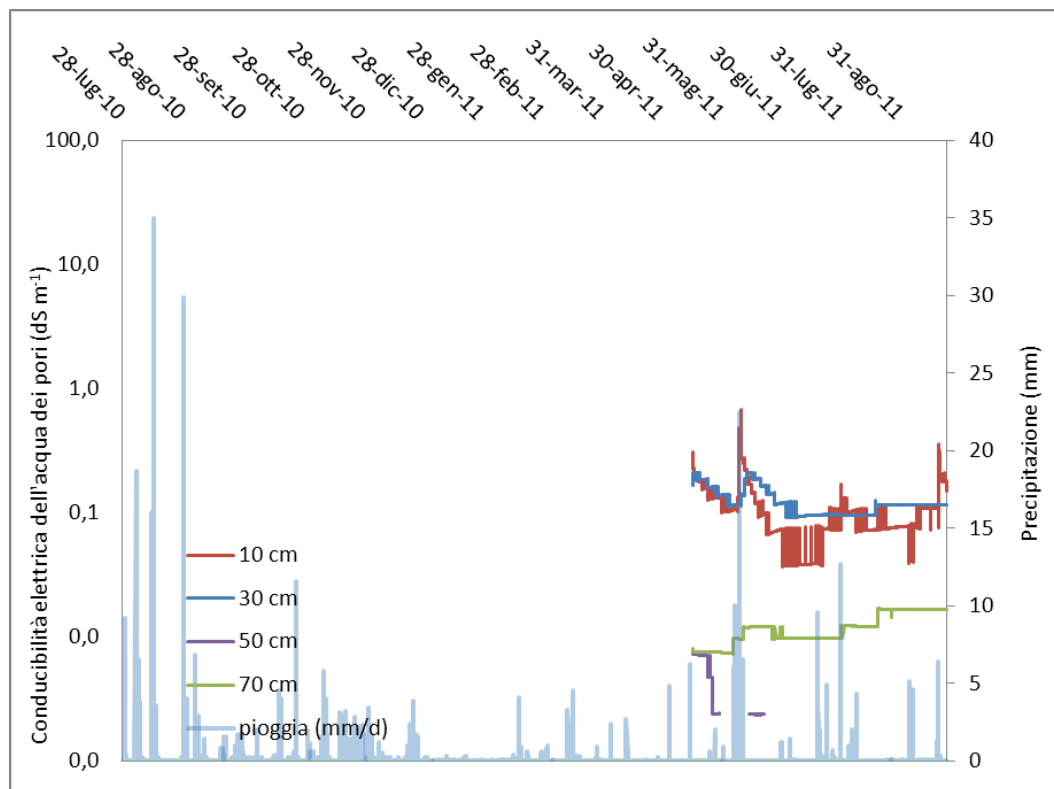


Figura 3.45 -  $EC_p$  (calcolata secondo il modello di Archie ottimizzato) per il terzo periodo di campionamento nella stazione E in relazione alla piovosità (mm/d)

Analizzando i livelli di salinità effettiva ( $EC_w$ ) a cui le piante si trovano, emerge come nelle stazioni A e C la coltura sia esposta a livelli critici. Il mais è mediamente tollerante alla salinità: la produttività potenziale del 100% si ottiene con valori di  $EC_{wi}$  pari a  $1.1 \text{ dS m}^{-1}$ ; scende al 90% a  $1.7 \text{ dS m}^{-1}$ ; raggiunge il 75% a 2.5 e il 50 % a  $3.9 \text{ dS m}^{-1}$  (Ayers, 1976).

I valori più elevati si riscontrano nei periodi estivi per quanto riguarda la stazione A, ad una profondità pari o superiore ai 50 cm, corrispondente all'area di sviluppo dell'apparato radicale; nella stazione C i valori risultano ancora più alti, incidendo in maniera significativa sulla produttività delle piante.

Le stazioni B, D, E risultano molto meno interessate da questo fenomeno per le diverse caratteristiche del suolo e la profondità della falda; le colture risultano comunque sottoposte a un notevole stress idrico soprattutto nelle stazioni B ed E, collocate nei due paleoalvei.

In caso di precipitazioni, si verifica una solubilizzazione dei sali presenti nel suolo con un conseguente aumento dell' $EC_p$  per tutte le stazioni in esame, ad eccezione della C, per cui avviene esattamente il contrario, a causa della progressiva diluizione della salinità.

## CONCLUSIONI

I risultati riguardanti il monitoraggio spazio-temporale della salinità nell'area di Ca' Bianca, hanno mostrato come lo spessore della zona vadosa, le caratteristiche chimico-fisiche del suolo e la distanza dalla Laguna di Venezia contribuiscano a creare profili di suolo molto diversi tra loro in termini di contenuto salino. Queste condizioni possono influenzare in modo significativo lo sviluppo e la resa delle colture agrarie coltivate.

Dall'analisi dei dati è emerso infatti che, nelle aree con maggiore conducibilità elettrica dell'acqua circolante e una falda superficiale, si verifica un accumulo di sali nel suolo che va a interessare in particolar modo l'area radicale delle piante. Nelle stazioni sabbiose invece, l'effetto della percolazione unito ad una scarsa risalita dalla falda e ad una bassa capacità di scambio cationico, contribuisce al mantenimento di un basso contenuto di sali. Queste aree sono tuttavia caratterizzate da una minore disponibilità d'acqua.

A livello agronomico quindi, le colture sono sottoposte a due diverse situazioni di stress: salino nelle aree in cui la falda è molto alta e il suolo trattiene maggiormente i sali, idrico nelle aree molto sabbiose lungo i paleoalvei.

Lo stress salino solitamente risulta maggiore d'estate, quando le elevate temperature, associate ad una bassa umidità relativa dell'aria, aumentando la domanda evapotraspirativa dell'ambiente, riducono la tolleranza delle piante alla salinità, a causa sia dell'incremento del flusso dell'acqua che dell'accumulo di soluti nella zona radicale (Losavio et al., 1999).

Di conseguenza, conoscendo la natura dei suoli e il grado di salinità, l'uso di un'irrigazione di precisione (localizzata e specifica per diverse aree di gestione) potrebbe aiutare a ridurre i potenziali stress abiotici a cui le piante vanno incontro. Tale approccio potrebbe aiutare sia a mantenere alto il valore di umidità nelle aree sabbiose, sia a dilavare i suoli troppo salini quando le piogge non sono sufficienti ad impedire la concentrazione dei sali.

La lisciviazione controllata è utile quando la salinità del terreno sta per raggiungere livelli di guardia, in funzione della tolleranza delle specie coltivate: questa strategia ci consente di tener conto delle precipitazioni che, se concentrate in un determinato periodo dell'anno, ad esempio quello autunno-invernale, possono essere sufficienti a dilavare il

terreno. La tecnica del dilavamento però può essere praticata quando la falda è abbastanza profonda, il terreno è sufficientemente permeabile e non esistono strati che impediscono la percolazione profonda. Invece, la presenza di una falda superficiale (come nella stazione C presa in esame) rende problematica la lisciviazione dei sali dallo strato di terreno sovrastante. In questo caso l'irrigazione presuppone un impianto di drenaggio che consenta il deflusso delle acque di percolazione e permetta di abbassare la falda freatica (Losavio et al., 1999). Un'alternativa all'abbassamento del livello di falda, in modo che l'acqua salmastra non entri direttamente a contatto con l'apparato radicale delle colture, potrebbe essere l'aggiunta superficiale di suolo; questa tecnica risulta però di difficile applicazione se relazionata all'ampiezza delle aree interessate al problema.

Per limitare gli effetti negativi legati ad alte concentrazioni saline, è quindi possibile impiegare colture meno tolleranti durante il periodo invernale, quando in genere è garantito un maggiore apporto idrico, mentre in primavera-estate si utilizzeranno specie che meglio si adattano a condizioni critiche di salinità.

Infine, i risultati di questo studio dimostrano come un'adeguata calibrazione della sonda resistivo-capacitiva 5TE permetta di discriminare l'effetto della composizione del suolo da quello della salinità della soluzione circolante, riuscendo quindi a risalire ai valori di  $EC_p$  attraverso la misura in continuo dell' $EC_a$ . Un monitoraggio costante di questo parametro consente infatti di intervenire con un'adeguata irrigazione, quando i valori di salinità della soluzione circolante superano soglie critiche.



## BIBLIOGRAFIA

5TE Operator's Manual Version 7, 2007-2010. Pullman WA. Decagon Devices

Allred B. J., Daniels J.J., Ehsani M. R. 2008. Handbook of Agricultural Geophysics. United States of America: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Amente, G. 2000. Estimation of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity in sandy soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1931-1939.

Araneo F., Bartolucci E., Boschetto R., Dacquino C., D'Aprile L., Di Fabbio A., Giovagnoli M. C., Jacomini C., Munafò M., Pascarella F., Quercia F., Rischia I., Romano L., Salvati L., Vecchio A., Barbano A., Borrello P., Corsini S., De Angelis R., La Valle P., Nicoletti L., Paganelli D., Pallottini E., Scopelliti M., Sinapi L., Spada E. 2009. Capitolo 8: Suolo e territorio; Capitolo 9: Ambito costiero. In *Annuario dei dati ambientali 2009*. Roma: ISPRA

Archie G.E., 1942. The Electric Resistivity Log As An Aid In Determining Some Reservoir Characteristics, *trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.* 146, 54 – 62.

Aringhieri R. 1999. I sali nel terreno. Firenze: CNR-INAPA.

ARPA Veneto. 2008. Carta salinità dei suoli della provincia di Venezia. [http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/suolo/file-e-allegati/Carta\\_salini\\_suoli.pdf](http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/suolo/file-e-allegati/Carta_salini_suoli.pdf)

Ayers, R.S. and D.W. Westcot. 1976. Water Quality for Agriculture . FAO Irrigation and Drainage Paper No, 29 (Rev 1), Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Badon-Ghyben W., Drabbe J. 1888-1889. Nota in verband met de voorgenomen put boring nabij Amsterdam. *Inst. Ingen. Tijdschr.* The Hague, Neth. 8-22.

Benincasa F., Maracchi G. 2001. Metodi elettrici per le misure IN SITU del contenuto idrico del terreno. Firenze: CNR-IBIMET

Carbognin L., e Tosi L., 2003. Il progetto ISES per l'analisi dei processi di intrusione salina e subsidenza nei territori meridionali delle province di padova e venezia. Venezia: ISES

Carbognin L. et al., 2005. L'intrusione salina nel comprensorio lagunare veneziano. Il bacino meridionale. *Giornale di Geologia Applicata* 2.

Cassata F., 2011. Calibrazione Simultanea Del Contenuto Idrico E Della Conducibilità Elettrica Del Suolo Di Una Sonda Resistivo-Capacitiva. Relatore Morari F., correlatore Scudiero E. Facoltà di Agraria: Scienze E Tecnologie Per L'ambiente E Il Territorio. UNIPD

Comel A. 1972. Il terreno, manuale di pedologia per gli agricoltori. Bologna: Edagricole.

Corwin, D. L., S. M. Lesch, and H. J. Farahani. 2008. Theoretical insight on the measurement of soil electrical conductivity, pp. 59 – 83. *In* B. J. Allred, J. J. Daniels, and M. R. Ehsani (eds.), Handbook of agricultural geophysics. CRC, Boca Raton, FL.

Dalton, F. N., Herkelrath W. N., Rawlins D. S., Rhoades J. D. 1984. Time domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. Science Magazine. Vol. 224 no. 4652 pp. 989-990.

Dazzi, 2007. La salinizzazione. In: Il suolo, la radice della vita. Roma: APAT

De Franco R, Biella G, Tosi L, Teatini P, Lozej A, Chiozzotto B et al. 2009. Monitoring the saltwater intrusion by time lapse electrical resistivity tomography: The Chioggia test site (Venice Lagoon, Italy). Journal of Applied Geophysics. 69:117-130.

DL6-TE User Manual. Delta-T Devices. UMS GmbH: München

Dyer, C.L., Kopitte, P.M., Sheldon, A.R., Menzies, N.W. 2008. Influence of soil moisture content on soil solution composition. Soil Sci. Soc. Am. J. 72(2), 355-361.

Em50 User's Manual Version 7. Pullman, WA. Decagon Devices - UMS GmbH

European Commission - Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability. 1999. Salinisation. <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/>

Fabbio A. e Fumanti F. 2008. Il suolo, la radice della vita. Roma: APAT.

Friedman, S. P. 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review. Computers and Electronics in Agriculture, 46, 45-70.

Gardner C.M.K., Robinson D., Blyth K., Cooper J.D., 2000. Soil Water Content. In: Smith K.A., Mullins C.E., Soil and Environmental Analysis: Physical Methods, 2nd edn. Marcel Dekker. New York.

Giardini L. 2002. Agronomia generale ambientale e aziendale. Bologna: Patron editore.

Hamed Y., Persson M., Berndtsson R. 2003. Soil Solution Electrical Conductivity

Measurements Using Different Dielectric Techniques. Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 67 No. 4, p. 1071-1078.

Heimovaara, T.J. 1995. Assessing temporal variations in soil water composition with time domain reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J. 59:689-698.

Herzberg A., 1901. Die Wasserversorgung einiger Nordsee baden. J. Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 44: 815–819, 842–844. Munich.

Hilhorst, M.A. 2000. A pore water conductivity sensor. Soil Sci. Soc. Am. J. 64:1922-1925.

Hillel D. 1998. Environmental Soil Physics,. S. Diego, CA. Academic Press

ISPRA, 2009. Annuario dei dati ambientali: tematiche in primo piano. Roma, ISPRA

Katerjii N., Van Hoorn J.W, Hamdy A., Mastrorilli M., 2000. Salt tolerance classification of crops to soil salinity and to water stress day index. Elsevier

Kruskal, W. H., Wallis, W. A., 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. J. Amer. Statist. Assoc. 47, 583–621.

Losavio N., Mastrorilli M., Ventrella D. 1999. Principi e tecniche di coltivazione in condizioni di salinità. Atti del Convegno POM Misura 2, Progetto “OTRIS”: “Le acque salmastre come risorsa idrica: limiti e prospettive”. Foggia 5 maggio 1999. 37- 46.

Malicki, M.A. 1999. Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity. Eur. J. Soil Sci. 50:505-514.

Marconi, V. 2011. Effetti della vegetazione e del drenaggio, sull'intrusione salina nell'acquifero freatico costiero della zona compresa fra foce dei fiumi uniti e foce bevano (Ravenna). Relatore Antonelli M. Correlatore Dinelli E. Facoltà di Scienze ambientali: tutela e gestione delle risorse naturali. Università di Bologna

Masiero G., 2011. Caratterizzazione Della Salinità Dei Suoli In Un'area Costiera Veneta. Relatore Morari F., correlatore Scudiero E. Facoltà di Agraria: Tutela e riassetto del territorio. UNIPD

Millero F. J. 1996. Chemical Oceanography. Boca Raton, Florida: CRC Press

MPS-1 Dielectric Water Potential Sensor Operator's Manual. 2008-2009. Pullman WA. Decagon Devices

Mualem, Y., Friedman. 1991. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. *Water Resour. Res.* 27:2771-2777.

Neri L. 2010-2011. Analisi fattoriale, componenti principali. UNISI

Papa M., 2012. La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia: l'influenza sulla produttività di *Zea mais* L. Relatore Berti A., correlatore Scudiero E. Facoltà di Agraria: Scienze e tecnologie agrarie. UNIPD

Pardossi A., Incrocci L, Incrocci G., Malorgio F., Battista P, Bacci L., Rapi B., Marzioletti P. Hemming J., Balendonck J., 2009. Root Zone Sensors for Irrigation Management in Intensive Agriculture. *Sensors* 9, 2809-2835.

Persson, M. 2002. Evaluating the linear dielectric constant-electrical conductivity model using time domain reflectometry. *Hydrol. Sci. J.* 47:269-278.

Rhoades J.D., Chanduvi F., Lesch S., 1999. Soil salinity assessment. Method and interpretation of electrical conductivity measurement. Rome: FAO, irrigation and drainage paper.

Rhoades J.D., 1978. Monitoring soil salinity: a review of methods. Establishment of water quality monitoring programs.

Richards L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agriculture Handbook* nr. 60, U. S. D. A.

Saito T., Fujimaki H., Inoue M., 2008. Calibration and Simultaneous Monitoring of Soil Water Content and Salinity with Capacitance and Four-electrode Probes. *American Journal of Environmental Sciences* 4 (6): 683-692

Scudiero, E.; Deiana, R.; Teatini, P.; Cassiani, G.; Morari, F. 2011. Constrained Optimization of Spatial Sampling in Salt Contaminated Coastal Farmland using EMI and Continuous Simulated Annealing. *Procedia Environmental Sciences* . 7, 234-239.

Scudiero et al. 2012. Modello ad hoc

Servizio Suoli ARPAV. 2012. Metodologia per la determinazione delle aree con diversa capacità protettiva dei suoli. <http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/suolo>

SK20 Pore water sampler, User Manual. 2008. UMS GmbH: München

Soil water extraction methods. 2008. UMS GmbH München

T8 Long-term Monitoring Tensiometer, User Manual. 2011. UMS GmbH: München

Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16: 574-582.

Viezzoli, A., L. Tosi, P. Teatini, Silvestri S. 2010. Surface water–ground- water exchange in transitional coastal environments by airborne electro-magnetics: The Venice Lagoon example. *Geophysical Research Letters*, Vol. 37 L01402.

Violante P. 2002. *Chimica del suolo della nutrizione delle piante*. Bologna: Edagricole

Wriedt G., Bouraoui F. 2009. Large scale screening of seawater intrusion risk in Europe. Luxembourg: JRC European Communities





*Ringrazio il Professor Francesco Morari per la disponibilità e la pazienza con cui mi ha seguito in questo lavoro di tesi.*

*Grazie infinite anche al Dott. Elia Scudiero, per avermi introdotto e guidato nei meandri di questo argomento e per i preziosi consigli “transoceanici”!*

*Un ringraziamento particolare ai miei genitori Gabriella e Fausto, che hanno sempre sostenuto ogni mia scelta; a Elena, per aver sistemato la punteggiatura, ma non solo per questo.*

*A tutte le persone, amici e parenti, che condivideranno con me la gioia di questo momento.*